



GRUNDZÜGE

der

GLEICHSTROM-TECHNIK

Eine gemeinfassliche Darstellung der Grundlagen

der

Starkstrom-Elektrotechnik des Gleichstromes

für

Ingenieure, Architekten, Industrielle, Militärs, Techniker und Studierende.

Von

RICHARD RÜHLMANN

Dr. phil. und Professor.

Mit über 400 Abbildungen.

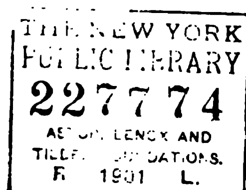
Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage.



Leipzig

Verlag von Oskar Leiner

1901.


NEW YORK
227774
AND
1901

Vorwort.

Das Bedürfnis nach Kenntnissen aus dem Gebiete der Elektrotechnik wächst um so mehr, je weitere Verbreitung das elektrische Licht findet, je mehr die Arbeitsübertragung auf elektrischem Wege an technischer Bedeutung zunimmt, und je vielseitiger die Anwendungen der Elektrochemie in der Praxis werden.

Die anspruchslose Arbeit, die hiermit der Öffentlichkeit übergeben wird, ist vorzugsweise für diejenigen bestimmt, denen es darum zu thun ist, eine über die populären Darstellungen hinaus reichende Einsicht zu gewinnen, und die nicht Zeit haben viele Monate auf das anstrengende Studium umfänglicher, eingehende Kenntnis der höheren Mathematik voraussetzender Werke zu verwenden.

Die Darstellung in diesem Buche ist so einfach gewählt, als mit einer wissenschaftlichen Behandlung des Stoffes verträglich ist. Jeder, der die Vorbildung besitzt, wie sie etwa die Realschulen oder die oberen Klassen eines Realgymnasiums oder Humangymnasiums vermitteln, werden ohne Schwierigkeit den Auseinandersetzungen zu folgen im stande sein.

Die physikalischen Vorkenntnisse der eigentlichen Elektrotechnik, die elektrotechnisch wichtigen Messverfahren, ferner die Stromquellen, welche Gleichstrom liefern, sind soweit eingehend behandelt, als dies zur Einführung in diese Gebiete nötig ist. Auch die Anwendungen der Gleichstrommaschinen als Elektromotoren und die Akkumulatoren sind berücksichtigt worden.

Da es jedoch nur beabsichtigt war, die Grundzüge der Elektrotechnik in elementarer Darstellung zu geben, und dies zunächst nur in verhältnismässig enger Umgrenzung, so wurde der Wechselstrom nur andeutungsweise in den Kreis der Betrachtung gezogen; die eigentliche Wechselstromtechnik und die praktischen Anwendungen der Elektrizität sind dagegen nicht mit behandelt worden. Diese Gebiete bleiben einer weiteren Veröffentlichung vorbehalten, für die das in diesem Buch vorliegende Material die Grundlagen abgeben soll.[1])

---

[1]) Die hier angekündigte Schrift ist inzwischen (1898) unter dem Titel: »Wechselstrom-Technik« im gleichen Verlage erschienen.

Möge das Werk in den Kreisen, für die es bestimmt ist, eine freundliche Aufnahme und bei den Fachgenossen eine wohlwollende Beurteilung finden!

Allen denen, die mir in gütiger Weise ihre Unterstützung haben zuteil werden lassen, erlaube ich mir auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Döbeln, Anfang April 1895.

Der Verfasser.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Der verhältnismässig rasche Absatz der ungewöhnlich starken ersten Auflage dieses Buches darf wohl als ein Zeichen dafür angesehen werden, dass die Auswahl des Stoffes und die Art der Darstellung einem vorhandenen Bedürfnisse entsprochen hat.

In dieser neuen Auflage ist ein Kapitel über die Lichtwirkungen des elektrischen Stromes hinzugekommen, in dem das physikalisch und technisch Wichtigste über Glühlicht, Bogenlicht, die Bremer'sche Bogenlampe und die Nernstlampe mitgeteilt wird. Der neuen Bearbeitung der chemischen Wirkungen des Stromes ist durchaus die Ionentheorie zu Grunde gelegt worden.

Im Übrigen ist überall Veraltetes ausgeschieden, der Verbesserung Bedürftiges berichtigt und das bewährte Neue aufgenommen worden.

Zeichnungen und Beschreibungen ausgeführter Maschinen hinzuzufügen, konnte ich mich, trotz der mehrfach geäusserten Wünsche, nicht entschliessen, da hieran in der Litteratur kein Mangel ist. Wer sich mit der Konstruktion elektrischer Maschinen beschäftigen will, findet reiches Material von trefflichen Beispielen in den in diesem Buche mehrfach citierten[1]) Veröffentlichungen von Arnold, Fischer-Hinnen, Kapp, Krämer, Schmidt-Ulm und anderen.

Durch die zahlreichen Ergänzungen hat der Umfang des Werkes und die Zahl der Figuren, trotz thunlichster Beschränkung, erheblich zugenommen; möchten die Freunde des Buches finden, dass die Brauchbarkeit in gleichem Masse gewachsen ist.

Döbeln, Mai 1901.

Der Verfasser.

---

[1]) Vergl. S. 501.

Inhaltsübersicht.

I. Kapitel.

Grundbegriffe und Grundgesetze der Elektrizität.

II. Kapitel.

Die Wärmewirkungen des elektrischen Stromes.

III. Kapitel.

Die Lichtwirkungen des elektrischen Stromes.

IV. Kapitel.

Die chemischen Wirkungen des Stromes.

V. Kapitel.

Magnetische Erscheinungen.

VI. Kapitel.

Elektromagnetische Erscheinungen.

VII. Kapitel.

Elektrodynamische Wirkungen der Ströme.

VIII. Kapitel.

Die Induktionserscheinungen.

IX. Kapitel.

Das absolute Masssystem.

X. Kapitel.

Die Messung der Stromstärke.

XI. Kapitel.

Spannungsmessungen.

XII. Kapitel.

Die Messung der elektrischen Arbeit und Leistung. Elektrizitätszähler.

A. Motorzähler.

B. Absatzweise wirkende Zähler.

C. Uhrenzähler.

XIII. Kapitel.

Widerstandsmessungen.

XIV. Kapitel.

Messung der Lichtstärke und Helligkeit.

XV. Kapitel.

Magnetische Messungen.

A. Messung der Stärke von Magnetfeldern.

B. Methoden der Untersuchung der magnetischen Eigenschaften des Eisens.

XVI. Kapitel.

Die Messung der Induktionskoëffizienten.

XVII. Kapitel.

Messung der Kapazität.

XVIII. Kapitel.

Die Messung der mechanischen Leistung.

XIX. Kapitel.

Die Schaltungen an dynamoelektrischen Maschinen.

XX. Kapitel.

Die Theorie der Gleichstrommaschinen.

XXI. Kapitel.

Berechnung des Ankers von Gleichstrommaschinen.

XXII. Kapitel.

Die Berechnung der Feldmagnete.

XXIII. Kapitel.

Berechnung einer vierpoligen Trommelmaschine mit Nutenanker und Stahlgussfeldmagneten.

XXIV. Kapitel.

Die Gleichstrommaschinen als Motoren.

XXV. Kapitel.

Einzelheiten des Baues von Dynamomaschinen.

XXVI. Kapitel.

Gleichstrommaschinen mit offenem Anker.

XXVII. Kapitel.

Die galvanischen Elemente.

XXVIII. Kapitel.

Die Akkumulatoren.

XXIX. Kapitel.

Die praktische Anwendung der Akkumulatoren.



GRUNDZÜGE

DER

GLEICHSTROM-TECHNIK.





I. Kapitel.

Grundbegriffe und Grundgesetze der Elektrizität.

1. Einleitung.

Positive und negative Elektrizität; Leiter und Nichtleiter.

Wenn man zwei Körper von verschiedener chemischer Beschaffenheit oder auch nur Körper von verschiedener physikalischer Beschaffenheit zur Berührung bringt, so werden an der Berührungsstelle unter gleichzeitigem Auftreten chemischer Vorgänge gleichgrosse Mengen Elektrizität von entgegengesetzten Vorzeichen hervorgebracht.

Bei gewissen Körpern bleibt die Elektrizität an den Stellen haften, an welchen sie erzeugt worden ist. Diese Körper nennt man Nichtleiter, Isolatoren, diëlektrische Körper. Zu ihnen gehören Hartgummi, Guttapercha, Kautschuk, die meisten Harze und festen Fette, Glas, Porzellan, Schwefel, trockenes Papier und Holz, Seide, die meisten Gase und einige Flüssigkeiten. Bei anderen Substanzen verteilt sich die hervorgerufene Elektrizität sofort über die ganze Oberfläche; solche Materialien nennt man Leiter; zu ihnen gehören die Metalle, Kohle und die meisten Flüssigkeiten.

Der veränderte Zustand eines Körpers, der dadurch eintritt, dass er elektrisiert wird, zeigt sich zunächst durch das Auftreten von Anziehungs- und Abstossungserscheinungen, die nicht beobachtet werden, sobald man auf irgend eine Weise die Elektrizität wieder entfernt.

Wenn zwei Körper mit derselben Elektrizitätsart behaftet sind, so stossen sie sich gegenseitig ab, weil die gleichartigen Elektrizitäten sich abstossen; zwei mit ungleichartigen Elektrizitäten beladene Körper ziehen sich dagegen an, weil ungleichartige Elektrizitäten sich gegenseitig anziehen und sich zu neutralisieren streben.

Da gleiche Mengen der verschiedenen Elektrizitätsarten sich gegenseitig völlig neutralisieren, wenn sie zusammengebracht werden, sodass ein Leiter, dem man gleichgrosse Mengen der entgegengesetzten Elektrizitäten zugeführt hat, sich vollständig wie ein nichtelektrisierter

Körper verhält, so hat man die beiden Elektrizitäten als positive und negative unterschieden, weil sie, wie zwei gleichgrosse positive und negative Grössen, nach ihrer Vereinigung Null ergeben.

2. Coulomb'sches Gesetz.

Die Kraft, mit welcher zwei elektrisierte Körper aufeinander einwirken, hängt von der Entfernung der Körper und dem Grade der Elektrisierung ab. Einen geringfügigen Einfluss übt auch das Mittel aus, durch welches hindurch die anziehende oder abstossende Wirkung stattfindet.

Man sagt, zwei Körper besitzen gleichgrosse Elektrizitätsmengen, wenn sie in derselben Entfernung auf einen und denselben dritten Körper genau gleichgrosse anziehende oder abstossende Kräfte ausüben.

Ein Körper[1] aber besitzt die n fache Elektrizitätsmenge, wenn er in gleichem Abstande auf einen anderen Körper die n fache anziehende oder abstossende Wirkung ausübt.

Durch Versuche mit einer für diesen Zweck konstruierten Drehwage hat Coulomb bewiesen, dass die Anziehungs- oder Abstossungskraft zwischen zwei im Verhältnisse zu ihrem Abstande r sehr kleinen Körpern, von welchen der eine die Elektrizitätsmenge e_1, der andere die Elektrizitätsmenge e_2 besitzt, durch die Formel

$$F = K \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

dargestellt werden kann. Bezeichnet man positive Elektrizitätsmengen durch das positive, die negativen Elektrizitätsmengen durch das entgegengesetzte Vorzeichen, so wird F positiv für den Fall der Abstossung (F strebt r zu vergrössern), hingegen erhält F ein negatives Vorzeichen, wenn es sich um eine anziehende Kraft handelt (die eine Verkleinerung von r hervorzubringen sucht).

Der Proportionalitätsfaktor K hängt besonders von den gewählten Masseinheiten ab, anderseits wird sein Betrag aber auch einigermassen von dem Mittel bestimmt, welches zwischen den beiden Körpern sich befindet.

3. Die Definition der elektrostatischen Elektrizitätseinheit.

Setzt man in vorstehender Gleichung $K = 1$, $r = 1$, $F = 1$ und $e_1 = e_2$, so erhält man:

$$e_1 = e_2 = +1$$

[1]) Hierbei ist stillschweigend vorausgesetzt, dass die Körper im Verhältnis zu ihren Entfernungen sehr klein sind.

und daraus als Begriff der Einheit der Elektrizitätsmenge: Die Elektrizitätsmenge von der Grösse Eins ist diejenige, welche eine gleichgrosse, im Abstande von 1 *cm* befindliche Elektrizitätsmenge mit der Kraft 1 abstösst.[1])

4. Elektrisches Feld, elektrische Kraftlinien.

Aus dem Coulomb'schen Gesetze folgt, dass die anziehenden und abstossenden Kräfte eines elektrischen Körpers nach aussen in zunehmender Entfernung rasch abnehmen, streng genommen aber mit verschwindend kleiner Wirkung bis in unendlich grosse Entfernung hinausreichen.

Der Raum, in welchem noch eine merkliche Wirkung nachweisbar ist, heisst »das elektrische Feld« des Körpers.

Wenn mehrere elektrisierte Körper in einem Raume vorhanden sind, so vereinigen sich deren Wirkungen an jedem Punkte zu einer Resultante. Denkt man sich nun in diesem Raume einen vollkommen freibeweglichen, masselosen,[2]) mit Elektrizität beladenen Punkt, so bewegt sich derselbe an jeder Stelle in der Richtung der Resultante der Kräfte, und die von dem Punkte zurückgelegte Bahn heisst eine elektrische Kraftlinie.

5. Elektrisches Potential, elektrische Arbeit.

Die gesamte Arbeit, welche geleistet werden muss, um eine ausserhalb eines elektrischen Feldes befindliche positive Elektrizitätsmenge von der Grösse 1 bis zu einer Stelle innerhalb dieses Feldes zu bringen, nennt man das elektrische Potential an dieser Stelle. Dabei ist es vollständig gleichgiltig, auf welchem Wege die Elektrizitätsmenge an diese Stelle gelangt, ähnlich wie eine schwere Masse in einer bestimmten Höhe über dem Erdboden immer dieselbe Fähigkeit besitzt, durch ihr Niedersinken zum Boden Arbeit zu leisten, gleichviel auf welchem Wege diese schwere Masse in diese Höhe gebracht worden ist.

Die Arbeit, die erforderlich ist, um eine Elektrizitätsmenge q von der Grenze eines elektrischen Feldes (im allgemeinen also aus unendlicher Ferne) an eine bestimmte Stelle innerhalb dieses Feldes

[1]) Die Krafteinheit, »Dyne« genannt, ist die Kraft, welche einer Masse von 1 Gramm in 1 Sekunde eine Beschleunigung von 1 Centimeter erteilen würde. — In der Elektrotechnik bedienen wir uns übrigens dieser elektrostatischen Einheit nicht, sondern einer anderen, etwas abweichend definierten Einheit.

[2]) Also einen Punkt ohne Trägheit.

zu bringen, ist das $q$fache von der Arbeit, die man vorher aufwenden musste, um die Elektrizitätsmenge 1 aus unendlicher Ferne an dieselbe Stelle zu bringen. Bezeichnet man also die für die positive Elektrizitätsmenge 1 erforderliche Arbeitsmenge, oder das elektrische Potential, an der betreffenden Stelle mit V, so ist $q \cdot V$ die Arbeit, welche aufgewendet werden muss, um die Elektrizitätsmenge q, die sich ausserhalb des Feldes befand, an die nämliche Stelle innerhalb des Feldes zu bringen.

Befindet sich eine Elektrizitätsmenge q zunächst innerhalb eines elektrischen Feldes an einem Punkte P_1, an welchem das Potential den Wert V_1 besitzt, und will man diese Elektrizitätsmenge an einen anderen Punkt P_2 bringen, an welchem das Potential den Wert V_2 hat, so ist dazu die Arbeit $q \cdot V_2 - q \cdot V_1$, oder $q \cdot (V_2 - V_1)$ erforderlich.

Die Differenz $V_2 - V_1$ heisst die Potentialdifferenz zwischen den Punkten P_2 und P_1.

Die elektrischen Kräfte haben nun stets das Bestreben, die innerhalb eines elektrischen Feldes vorhandenen Elektrizitätsmengen von Stellen, an welchen ein höheres Potential herrscht, zu Stellen überzuführen, an welchen das Potential geringer ist. Es wird daher stets Arbeit verbraucht, wenn man eine Elektrizitätsmenge von einem niederen auf ein höheres Potential bringt; dagegen wird Arbeit frei und kann in andere Energieformen: Wärme, Licht, Magnetismus, Elektrizität, chemische Anziehung umgesetzt werden, wenn eine Elektrizitätsmenge von einer Stelle, an der ein höheres Potential herrscht, an eine andere Stelle übergeführt wird, an der das Potential geringer ist.

Flächen, auf welchen das elektrische Potential überall den nämlichen Wert hat, nennt man Niveauflächen. Wird eine Elektrizitätsmenge auf einer Niveaufläche fortbewegt, so wird bei diesem Vorgange weder Arbeit erzeugt, noch Arbeit verbraucht.

Jede Oberfläche eines Leiters, auf welchem Elektrizitätsmengen sich im Gleichgewichte befinden, muss somit eine Niveaufläche sein; denn herrschten an zwei Stellen verschiedene Potentiale, so würden die an der Stelle des höheren Potentiales befindlichen Elektrizitätsmengen sich von selbst nach jenen Stellen bewegen, an welchen das Potential geringer wäre. Das Gleichgewicht würde somit gestört werden müssen, was der Voraussetzung widerspricht.

Die elektrischen Kraftlinien, von welchen wir vorher gesprochen haben, müssen überall zu den Niveauflächen normal sein, sonst könnte eine Verschiebung einer Elektrizitätsmenge auf einer Niveaufläche nicht nach jeder beliebigen Richtung hin ohne jede Arbeitsleistung vollzogen werden.

6. Die Hypothesen über das Wesen der Elektrizität.

Über die eigentliche Natur der elektrischen Vorgänge sind wir zur Zeit noch vollständig im Unklaren. Aus den Versuchen von Hertz wissen wir neuerdings nur, dass gewisse elektrische Erscheinungen mit den Lichterscheinungen ausserordentliche Ähnlichkeit haben, sodass wir Ursache haben, zu vermuten, dass auch elektrische Vorgänge auf Schwingungen beruhen, ähnlich denjenigen, in welchen wir das Wesen des Lichtes erkannt zu haben meinen.

Für eine elementare Darstellung der elektrischen Wirkungen und ihrer praktischen Anwendungen ist zunächst aber mit der von Hertz angebahnten Auffassung noch nicht viel anzufangen, weil das grosse Gebiet der statischen oder Reibungselektrizität und vor allem das Gebiet der mit den elektrischen Strömen verknüpften Erscheinungen noch nicht von diesem Standpunkte aus Aufklärung erfahren haben. Für eine anschauliche und leichtverständliche Darstellung der Erzeugung und der Wirkungen der Elektrizität ist noch heute die zuerst von Symmer gegebene Art der Auffassung die einfachste, weil sie zahlreiche Analogien mit allgemein bekannten Vorgängen bei der Bewegung von Flüssigkeiten darbietet. Wir wollen im folgenden daher in der Hauptsache diese Anschauungsweise zu Grunde legen, uns aber stets bewusst bleiben, dass es sich nur um ein Bild handelt, nicht um eine Erklärung des wahren Wesens, und dass daher dieser Art der Darstellung die natürlichen Mängel einer bildlichen Ausdrucksweise anhängen müssen.

Nach Symmer sind in jedem Körper zwei unwägbare Fluida vorhanden, die positive und die negative Elektrizität. Sind von beiden Elektrizitätsarten gleiche Mengen vereinigt, so ist der Körper unelektrisch. Enthält ein Körper einen Überschuss an positivem Fluidum, so nennt man ihn positiv elektrisch geladen; man sagt, der Körper sei negativ elektrisch geladen, wenn in ihm ein Überschuss von negativem Fluidum vorhanden ist.

Auf diese angenommenen elektrischen Fluida übertragen wir nun die Eigenschaften, die wir an der Elektrizität wahrgenommen haben. Die gleichnamigen Fluida stossen sich ab, die ungleichnamigen ziehen sich an und haben das Bestreben, sich zu vereinigen, sich durch Vereinigung gleicher Mengen aufzuheben und in ihren Wirkungen zu neutralisieren.

Die Kräfte, welche eine Scheidung der vereinigten elektrischen Fluida bewerkstelligen, nennt man elektromotorische Kräfte.

7. Analogien zwischen gewissen elektrischen Vorgängen und den Erscheinungen, die bei schweren Flüssigkeiten wahrgenommen werden.

Wenn man die Elektrizität in bildlichem Ausdruck ein Fluidum, eine Flüssigkeit, nennt, so kann man elektrische Vorgänge mit den Erscheinungen vergleichen, welche bei schweren Flüssigkeiten wahrgenommen werden. Der Masse der Flüssigkeit entspricht die Elektrizitätsmenge, den Niveauflächen der Flüssigkeiten entsprechen die Flächen gleichen Potentiales der Elektrizität. Wie infolge der Anziehungskraft der Erde die schwere Flüssigkeit strebt, vom höheren Niveau auf das tiefste herabzuströmen, wenn sich hierzu die Möglichkeit bietet, so bewegt sich im ähnlichen Falle die Elektrizität von selbst von Stellen höheren Potentiales zu solchen niederen Potentiales. Als Niveau Null wird bei schweren Körpern der Meeresspiegel betrachtet; als elektrisches Potential Null wird von uns das Potential der Erde angenommen. Man sagt, ein Körper besitzt ein positives elektrisches Potential, wenn die Elektrizität von ihm zur Erde abzuströmen strebt; man redet von einem negativen Potential, wenn von der Erde zu ihm Elektrizität zuströmen muss, um ihn unelektrisch zu machen.

Hat man zwei Körper, von denen der eine sich auf einem höheren elektrischen Potentiale befindet, als der andere, und man verbindet beide Körper durch einen Leiter der Elektrizität, so strömt durch diesen Leiter so lange Elektrizität von dem Körper, der sich auf höherem Potentiale befindet, zu dem Körper, dessen Potential niedriger ist, bis sich beide Körper auf gleichem Potentiale befinden, ganz entsprechend dem Falle, dass man zwei Gefässe, in welchen sich die gleiche Flüssigkeit in ungleichem Niveau befindet, durch eine Röhre miteinander verbindet; alsdann fliesst auch bekanntlich aus dem Gefässe, in dem die Flüssigkeit höher stand, solange Flüssigkeit nach dem anderen zu, bis das Niveau in beiden Gefässen gleich geworden ist.

8. Das Ohm'sche Gesetz.

Erhält man in jedem der beiden Gefässe das Flüssigkeitsniveau unveränderlich, so fliesst durch die Röhre, welche beide Gefässe verbindet, ein stetiger Flüssigkeitsstrom, und die Menge i von Flüssigkeit, die in jeder Sekunde durch jeden Querschnitt des verbindenden Rohres fliesst, hängt einerseits ab von dem Niveauunterschied $V' - V''$ in den beiden Gefässen, anderseits von dem Querschnitte q und der Reibung, welche sich im Rohre der Bewegung der Flüssigkeit entgegenstellt. Diese Reibung, die im Rohre stattfindet, wird von der

Beschaffenheit des Rohres abhängig sein, und zwar, wenn man die Reibung in der Längeneinheit des Rohres mit k bezeichnet, gleich k · l, wenn die Länge des Rohres l Längeneinheiten beträgt. Hiernach ergiebt sich für die Flüssigkeitsmenge i, welche in jeder Sekunde durch jeden Querschnitt des Rohres fliesst, der Ausdruck:

$$i = \frac{(V' - V'') \cdot q}{k \cdot l} \text{ oder } i = \frac{V' - V''}{w} \quad . \ . \ . \ 2)$$

wenn man $\frac{k \cdot l}{q}$, den Gesamtwiderstand des Rohres, welches beide Gefässe verbindet, durch den Buchstaben w bezeichnet.

Ganz derselbe Ausdruck gilt auch für elektrische Ströme und führt dann den Namen Ohm'sches Gesetz.

In diesem Falle bedeutet i die Elektrizitätsmenge, welche in jeder Sekunde durch jeden Querschnitt des Leiters hindurch strömt; $V' - V''$ ist die konstante Potentialdifferenz oder die elektromotorische Kraft, w der Widerstand des vom elektrischen Strome durchflossenen Leiters.

Ohm hat dieses Gesetz im Jahre 1827 aufgestellt. Er ging jedoch nicht von der Ähnlichkeit mit den Vorgängen beim Überströmen einer Flüssigkeit aus einem Gefässe in ein anderes aus, sondern von der ebenso naheliegenden Vergleichung des elektrischen Stromes mit den Erscheinungen, welche man beobachtet, wenn man zwei Körper, die verschiedene Temperatur besitzen, durch einen Wärmeleiter (etwa einen Metallstab) miteinander verbindet. Die Temperaturen der beiden Körper spielen in diesem Falle dieselbe Rolle, welche bei den elektrischen Vorgängen das verschiedene elektrische Potential einnimmt.

Die Masseinheiten für die im Ohm'schen Gesetze auftretenden Grössen i, w und $V' - V''$ sind derart gewählt, dass ein Proportionalitätsfaktor in der Formel nicht auftritt.

Die Masseinheit für die Stromstärke ist das Ampère, d. i. ein Strom, der in einer Minute in einem Knallgasvoltameter 10,44 *ccm* Knallgas (von 0° und 760 *mm* Druck) liefert.

Der Leitungswiderstand wird in Ohm gemessen, und zwar ist ein Ohm der Widerstand, den eine cylindrische Quecksilbersäule von 106,3 *cm* Länge und 1 *qmm* Querschnitt (bei einer Temperatur von 0° C.) dem Strome entgegensetzt.

Als Einheit der Potentialdifferenz dient das Volt.

Durch einen Leiter von 1 Ohm Widerstand fliesst somit ein Strom von 1 Ampère, wenn an den Enden dieses Leiters eine Potentialdifferenz von 1 Volt herrscht.

Die gebräuchliche Abkürzung für Ampère ist A; als Bezeichnung für das Ohm dient der griechische dunkle O-Laut, der Buchstabe ω. Für Volt wird als Abkürzung der Buchstabe V gebraucht.

9. Der Leitungswiderstand.

Der Leitungswiderstand, d. i. die Grösse

$$w = k \cdot \frac{l}{q}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

die in der Gleichung des Ohm'schen Gesetzes vorkommt, hängt, wie man erkennt, zunächst von einem Zahlenfaktor k ab, der durch die Beschaffenheit des Leiters bedingt ist. Es setzen nämlich verschiedene Materialien dem elektrischen Strome sehr verschiedene Widerstände entgegen. Den geringsten Widerstand zeigt reines Silber in ausgeglühtem Zustande; einen nur wenig höheren Widerstand bietet das reine Kupfer dar, welches weitaus am meisten in der Elektrotechnik als Leitungsmaterial verwendet wird. Einen ungefähr 6 mal so grossen Widerstand besitzt Eisen und einen mehr als 12 mal so grossen das Blei, welches vielfach für selbstthätige Unterbrechungen (durch Abschmelzen) Anwendung findet, um Drahtleitungen vor übermässiger Inanspruchnahme durch zu starke Ströme zu sichern.

Der Leitungswiderstand eines Metalles kann schon durch ganz geringfügige Beimengungen anderer Substanzen wesentlich verändert werden. Im allgemeinen ist der Widerstand der Legierungen grösser als der reiner Metalle.

Wie die obige Formel zeigt, ist der Widerstand bei Drähten oder Stäben (und nur in dieser Form werden die Metalle in der Elektrotechnik im allgemeinen verwendet) direkt proportional der Länge des Drahtes und umgekehrt proportional dem Querschnitte.[1])

10. Widerstandseinheit, Ohm.

Als Einheit des Widerstandes dient, wie schon oben erwähnt wurde, der Widerstand, den eine Quecksilbersäule von 106,3 *cm* Länge und 1 *qmm* Querschnitt darbietet, wenn die Temperatur des Quecksilbers 0° C. beträgt. Dieser Widerstand wird 1 Ohm genannt,

---

[1]) Bei Wechselströmen von hoher Wechselzahl, d. h. bei Strömen, welche in der Zeiteinheit sehr viele Male die Richtung wechseln, treten allerdings infolge besonderer Vorgänge Abweichungen von diesem einfachen Gesetze ein, auf die wir an anderer Stelle zurückkommen.

und künftighin werden wir alle Widerstandsgrössen in dieser Einheit ausdrücken. Der Einfachheit wegen wird zur Bezeichnung des Ohms gewöhnlich das Zeichen ω gebraucht.

Ein Widerstand von 10 ω ist demnach ein solcher, der 10 mal so gross ist, als der einer Quecksilbersäule von 106,3 *cm* Länge und 1 *qmm* Querschnitt.

11. Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur und der physikalischen Beschaffenheit.

Die Widerstandseinheit bezieht sich deshalb auf 0° C., weil der Widerstand aller Substanzen etwas von der Temperatur abhängig ist. Derjenige der reinen Metalle nimmt mit wachsender Temperatur zu; der Widerstand der Kohle und der meisten Flüssigkeiten, auch der einiger Legierungen (zumal solcher, welche Mangan enthalten), wird bei höherer Temperatur geringer.

Ist der Widerstand eines Körpers bei 0° gleich w_0 und der bei t^0 gleich w_t, so ist mit für die Praxis genügender Genauigkeit:

$$w_t = w_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Hierin ist α ein Bruch, welcher angiebt, um wieviel der Widerstand eines Drahtes wächst, wenn seine Temperatur um 1° C. zunimmt.

Der Widerstand ist auch abhängig von der sonstigen physikalischen Beschaffenheit. Harte Drähte, gehämmerte Metalle, gegossene Stücke haben zumeist grössere Widerstände als weiche Metalle. Selbst durch geringfügige Bearbeitung werden Drahtwiderstände schon merklich verändert.

12. Die Grösse des Widerstandes verschiedener Substanzen.

In der Praxis wählt man für den je nach der Art der Substanz verschieden gross ausfallenden Koëffizienten k meist den Widerstand eines Drahtes von 1 *qmm* Querschnitt und 1 *m* Länge.

Diese Grösse $k = k_0 (1 + \alpha \cdot t)$ heisst der spezifische Leitungswiderstand der Substanz.

Wir teilen im Nachstehenden für die in der Praxis wichtigsten Metalle diese Koëffizienten, sowie die der Grösse α mit, welche die Veränderlichkeit mit der Temperatur ausdrückt:

Tabelle I.

Der Widerstand eines Drahtes in Ohm ist:

$$w_t = k_0 \cdot \frac{l}{q} \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

wenn l die Länge des Drahtes in Metern, q der Querschnitt in Quadratmillimetern ist.

Substanz	k_0	α	Bemerkung
Aluminium	0,03—0,05	+ 0,0039	
Blei (gepresst)	0,196	+ 0,00387	
Eisen (rein)	0,0975	+ 0,0048	
Eisendraht (schwed.) . .	0,0991	+ 0,0048	
Gold (geglüht)	0,0206	+ 0,00365	
Gold (hart)	0,0210	+ 0,00365	
Konstantan	0,5	+ 0,00003	58 Cu, 41 Ni, 1 Mn
Kruppin	0,85	+ 0,0008	
Kupfer (chem. rein) . .	0,0160	+ 0,0038	
Neusilber	0,267	+ 0,00034	
Nickel (geglüht)	0,124	+ 0,00365	
Nickelin	0,43—0,51	+ 0,0003 bis 0,00009	55 Cu, 25 Ni, 19,5 Zn
Platin (geglüht)	0,091	+ 0,0024	
Quecksilber (flüssig) . .	0,9434	+ 0,00091	
Silber (geglüht)	0,0151	+ 0,00377	
Silber (hart)	0,0163	+ 0,00377	
Zink (gepresst)	0,0593	+ 0,00365	
Zinn	0,1322	+ 0,00365	
Beleuchtungskohle . . .	39,0	— 0,0005	

Beispiel: Wie gross ist der Widerstand eines Kupferdrahtes von 100 *m* Länge und 3 *mm* Dicke bei 20° C.?

Hier ist:

$k_0 = 0{,}016$, $l = 100\,m$, q[1] $= r^2 \pi = \frac{d^2}{4} \cdot 3{,}1416 = 7{,}069\ qmm$, $\alpha = 0{,}0038$, $t = 20$

folglich:

$$w_{20} = 0{,}016 \cdot \frac{100}{7{,}069} \cdot (1 + 0{,}0038 \cdot 20) = \frac{0{,}016 \cdot 100 \cdot 1{,}076}{7{,}069}; \quad w_{20} = 0{,}244\ \omega.$$

13. Leitungsfähigkeit.

Den reciproken Wert des Leitungswiderstandes bezeichnet man mit dem Namen Leitungsfähigkeit. Gebraucht man für die Leitungsfähigkeit den Buchstaben r, so hat man

$$r = \frac{1}{w} = \frac{1}{k} \cdot \frac{q}{l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

---

[1]) Zumeist, jedoch durchaus nicht ausschliesslich, werden in der Elektrotechnik Drähte mit kreisrundem Querschnitte verwendet. Die Dicke d des Drahtes ist dann der Durchmesser des Kreises, der den Querschnitt bildet. Der Radius r des Kreises ist somit $r = \frac{d}{2}$, der Querschnitt $q = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$.

14. Einige Anwendungen des Ohm'schen Gesetzes.

Das Ohm'sche Gesetz

$$i = \frac{V' - V''}{w}$$

gilt sowohl für jeden einzelnen Teil eines Leiters, als auch für in sich geschlossene Stromkreise.

Hat man z. B. zwischen zwei Punkten A' und A'' einen Leitungsdraht gespannt, und sind V' und V'' die unveränderlichen elektrischen Potentiale an den Punkten A' und A'', so kann man, wenn zwei von den drei Grössen: Stromstärke, Potentialdifferenz und Widerstand gegeben sind, hieraus jedesmal die dritte Grösse berechnen. Der Abkürzung wegen wollen wir zunächst für die Potentialdifferenz V' — V'' den Buchstaben D gebrauchen.

$$V' - V'' = D.$$

Alsdann ist:

$$i = \frac{D}{w}, \quad w = \frac{D}{i}, \quad D = i \cdot w \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

Alle drei Formen des Ohm'schen Gesetzes werden häufig in der Elektrotechnik gebraucht, und wir wollen an der Praxis entnommenen Beispielen die Art der Verwendung zeigen.

1. Beispiel. Gesucht die Stromstärke i.

Der Widerstand eines Eisendrahtes beträgt $w = 8\ \omega$; derselbe dient zur Verbindung zweier Punkte eines Leitungsnetzes, die eine unveränderliche Potentialdifferenz von D = 12 Volt besitzen. Durch den Draht fliesst ein Strom von: $i = \frac{12}{8} = 1{,}5$ A.

2. Beispiel: Gesucht der Widerstand w.

a) Durch den glühenden Kohlenfaden einer 16kerzigen Glühlampe fliesst bei 65 Volt Spannungsdifferenz an den Enden des Fadens ein Strom von 0,8 Ampère. Wie gross ist der Widerstand des glühenden Fadens?

$$w = \frac{D}{i} = \frac{65}{0{,}8} = 81{,}25\ \omega.$$

b) Von zwei Punkten, die nebeneinander liegen, führt an eine 400 *m* entfernte Lampe, die 8 Ampère Strom verbraucht, eine kupferne Hin- und Rückleitung. Wie dick muss der Draht gewählt werden, damit der Spannungsverlust $D = V' - V''$ in der Leitung nur 1 Volt beträgt? Man berechnet zunächst den Widerstand w:

$$w = \frac{D}{i} = \frac{1}{8} = 0{,}125\ \omega.$$

Nun ist

$$w = k \cdot \frac{l}{q} \text{ und hieraus } q = \frac{k \cdot l}{w} = \frac{0{,}016 \cdot 800^{1)}}{0{,}125},$$

$$q = 12{,}8 : 0{,}125 = 102{,}4.$$

---

[1]) 800 *m*, weil sowohl zur Hin- als zur Rückleitung je 400 *m* Draht nötig sind.

Bezeichnet man den Durchmesser oder die Dicke des Drahtes, dessen Querschnitt = q ist, mit d, so ist bekanntlich:

$$q = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

und hiernach:

$$d = \sqrt{\frac{4\,q}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 102{,}4}{3{,}1416}} = 11{,}4\ mm.$$

Der Draht müsste demnach eine Dicke von 11,4 *mm* haben.

3. Beispiel: Gesucht die Potentialdifferenz oder der Spannungsverlust D. Nach einer 100 *m* entfernten Stelle, an der 10 Ampère Strom verbraucht werden, soll eine Leitung aus 3 *mm* dickem Kupferdrahte geführt werden. Wie gross ist der Spannungsverlust in der Leitung?

Man berechnet zunächst den Querschnitt des Leiters:

$$q = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{3^2 \cdot 3{,}1416}{4} = 7{,}0686\ qmm,$$

und hiernach den Widerstand (unter Berücksichtigung, dass Hin- und Rückleitung, also 2 × 100 = 200 *m*, in Ansatz zu bringen sind)

$$w = k \cdot \frac{l}{q} = 0{,}016 \cdot \frac{200}{7{,}0686} = 0{,}45\ \omega.$$

Nach der dritten Formel unter 7 ergiebt sich:

$$D = i \cdot w = 10 \cdot 0{,}45 = 4{,}5 \text{ Volt}$$

Der Spannungsverlust würde somit 4,5 Volt betragen.

15. Das Vorhandensein freier Spannung auf durchströmten Leitern.

Die letzte Formel

$$D = i \cdot w$$

hat schon gezeigt, dass zwischen zwei Punkten, A′ und A″, in welchen die Potentiale die Werte V′ und V″ haben, und die durch einen Leiter vom Widerstande w verbunden sind, die Spannungsdifferenz D = V′ — V″ verbraucht wird, oder, wie wir uns auch ausdrücken, verloren geht. Ist der Leiter, der die Punkte A′ und A″ verbindet, ein Draht von durchaus gleicher Stärke, so muss die Abnahme des Potentiales von A′ bis A″ ganz gleichförmig stattfinden.

Von der Richtigkeit dieser Schlussfolgerung hatte sich schon Ohm selbst und nach ihm besonders Kohlrausch durch Versuche überzeugt, indem sie nachwiesen, dass eine elektrische Spannung auf jedem Leiter wahrnehmbar war, mit dem sie die Pole einer elektrischen Batterie verbunden hatten.

Auch hinsichtlich dieser Erscheinung ist die Analogie mit dem von uns vergleichsweise gewählten Beispiele vorhanden, in dem wir annahmen, dass Flüssigkeit aus einem Gefässe A′ durch ein verhältnismässig enges Rohr in ein anderes Gefäss A″ überströme, in welchem das Flüssigkeitsniveau niedriger steht, als in dem ersten. (Vergl. Fig. 1.)

Bringen wir nämlich an dem Rohre, durch welches das Überströmen stattfindet, vertikale offene Proberohre Q, P, O, N, M an, die es gestatten, den Druck zu messen, welchen die strömende Flüssigkeit auf die Rohrwandung ausübt, so finden wir, dass unmittelbar neben der Ansatzstelle des oberen Rohres die Flüssigkeit in Q ziemlich ebenso hoch steigt, als im benachbarten Gefässe A′, dass dagegen in den weiter nach dem Gefässe A″ hin gelegenen Messrohren P, O u. s. f. die Flüssigkeit auf immer geringere Höhen steigt, bis in dem Rohre M, welches dicht neben dem Gefässe A″ liegt, in welchem das Flüssigkeitsniveau niedriger ist, die Flüssigkeit nur ganz wenig höher steht, als in diesem.

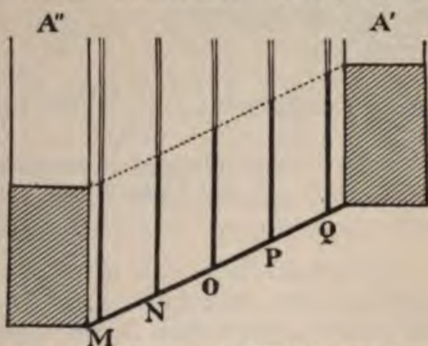


Fig. 1. Druckabnahme bei Flüssigkeitsströmen.

Ganz ähnlich gestaltet sich die Sache, wenn man z. B. in eine kreisförmige Rinne mit rechteckigem Querschnitte, die mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist, eine Zink-Kupferplatte einsetzt. Infolge der chemischen Wirkung an den Platten, besonders an der Zinkplatte, entsteht dauernd eine Potentialdifferenz zwischen beiden Platten, sodass eine elektrische Strömung in der Richtung vom Kupfer zum Zink und von da durch die Flüssigkeitsstrecke zum Kupfer zurück entsteht.



Fig. 2. Spannungsgefälle in einem vom elektrischen Strome durchflossenen Leiter.

Vernachlässigen wir die Plattendicke, denken wir uns den ganzen Stromkreis in eine gerade Linie ausgebreitet, und tragen wir die elektrischen Potentiale an allen Punkten des Leiters als senkrechte Ordinaten an jeder Stelle auf, so entsteht ein Bild, wie es die obenstehende Fig. 2, I zeigt. Dieser Fall setzt voraus, dass der Leiter vollständig isoliert ist.

Die Länge Z K ist die Anzahl der Widerstandseinheiten des Leiters. Der Höhenunterschied der Punkte P und Q ist die Potentialdifferenz $V' - V'' = D$. Da nach dem Ohm'schen Gesetze $\frac{D}{w} = i$ ist, so muss auch $\frac{\overline{PZ} + \overline{KQ}}{\overline{ZK}} = i$ sein. Der links stehende Quotient ist aber sichtlich die trigonometrische Tangente des Winkels, den die Gerade P Q mit der Linie Z K einschliesst.

$$i = \tan \alpha \qquad \qquad 8)$$

Während das soeben besprochene Bild sich auf den Fall bezieht, dass der ganze Leiterkreis isoliert ist, gestaltet sich die Sache wesentlich anders, wenn man irgend eine Stelle desselben mit der Erde leitend verbindet, sodass diese Stelle das Potential der Erde, das Potential Null, annimmt.

Durch die chemische Thätigkeit an den Platten wird die Potentialdifferenz, also der Höhenunterschied zwischen P und Q, unveränderlich erhalten. Da ferner die Anzahl der Widerstandseinheiten des Leiters dieselbe bleibt, so bleibt auch das Gefälle der geraden Linie, welche die verschiedenen Potentiale verbindet, dasselbe. Während aber das Potential Null vorher in der Mitte des Leiters beobachtet wurde, herrscht jetzt an dem Punkte M, der mit der Erde in leitender Verbindung steht, das Potential Null. Alsdann stellt die Fig. 2 II die Verteilung des Potentiales längs des Leiters dar. Das Gefälle und somit die Neigung α der Linie P Q gegen die Linie Z K bleiben dabei ungeändert.

In der weiter folgenden Fig. 2 III ist der Fall abgebildet, dass das eine Ende des Leiters, also eine Seite (die Kupferplatte) der Doppelplatte, mit der Erde in Verbindung gesetzt worden ist.

16. Zwei elektromotorische Kräfte im Stromkreise. Klemmenspannung.

Etwas anders gestaltet sich die Sache, wenn in dem Leiterkreise selbst eine zweite Ursache einer dauernden Potentialdifferenz, eine zweite elektromotorische Kraft auftritt, die auf der einen Seite durch den Widerstand w', auf der anderen Seite durch einen Widerstand w'' von der ersten elektromotorischen Kraft getrennt ist. Im Punkte A_1 sei z. B. eine Potentialdifferenz D', im Punkte A_2 eine zweite entgegengesetzte D'' vorhanden; das eine Ende des Leiters, dessen Widerstand w'' beträgt, sei mit der Erde verbunden. Um in diesem

Falle ein Bild von der Verteilung der Spannung zu erhalten, trägt man in A_1 die algebraische Summe der Spannungen $D' - D''$ auf, $A_1 P = D' - D''$, und verbindet P mit dem Punkte K, der um die Summe der Widerstände $w' + w''$ von A_1 absteht; denn an diesem Punkte ist, weil er mit der Erde in leitender Verbindung steht, nach Voraussetzung das Potential Null. Zu dieser Linie zieht man durch den Punkt Q, der um D″ höher liegt als P, die Parallele; da die Stromstärke im ganzen geschlossenen Leiterkreise dieselbe ist, muss auch das Gefälle der Potentiallinie überall dasselbe sein. Auf diese Weise entsteht die gebrochene Linie Q M N K, welche den Verlauf des Potentiales darstellt.

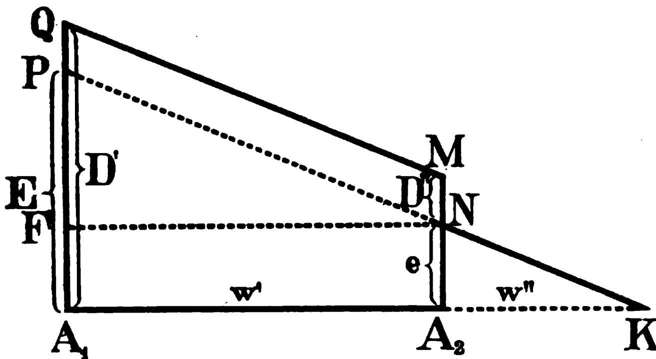


Fig. 3. Spannungsverteilung in einem Stromkreise, in dem sich zwei elektromotorische Kräfte befinden.

Dieses soeben entstandene Bild, Fig. 3, giebt z. B. den Verlauf in einem Stromkreise, welcher aus einem galvanischen Elemente und einem Leitungsdrahte gebildet wird, der die beiden in A_1 und A_2 befindlichen Platten dieses Elementes verbindet.

In unserer Figur ist im Dreiecke A_1 P K

$$\tan \alpha = \frac{\overline{P A_1}}{\overline{A_1 K}} = \frac{D' - D''}{w' + w''} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

tan α ist aber die Stromstärke i, und somit gilt der Satz: In einem in sich geschlossenen Stromkreise ist die Stromstärke gleich dem Quotienten aus der algebraischen Summe der im Stromkreise auftretenden elektromotorischen Kräfte und der Summe der Widerstände.

Ferner ist ebenso im Dreiecke F P N

$$\overline{F P} = \overline{F N} \cdot \tan \alpha.$$

Nun ist aber $\overline{FP} = \overline{PA_1} - \overline{FA_1} = \overline{PA_1} - \overline{NA_2}$, und hierin ist die Strecke $\overline{PA_1}$ das Gesamtgefälle, oder gleich $D' - D''$, d. h. die Potentialdifferenz in A_1 und A_2, die man die elektromotorische Kraft des Elementes nennt; dagegen ist $\overline{NA_2}$ das Nutzgefälle, von dem die Stromstärke im äusseren Stromkreise abhängt, oder der an beiden Polklemmen des Elementes auftretende Potentialunterschied, den man die Klemmenspannung des Elementes nennt. Bezeichnet man die elektromotorische Kraft, d. h. die Potentialdifferenz $\overline{A_1 P} = D' - D''$ des Elementes mit E, die Klemmenspannung $\overline{A_2 N}$ mit e, so ist also

$$\frac{E - e}{\overline{FN}} = \tan \alpha,$$

oder, da $\overline{FN}$ der innere Widerstand w′ des Elementes oder der Stromquelle und $\tan \alpha$ die Stromstärke ist, so hat man

$$\frac{E - e}{w'} = i, \text{ oder } E - e = i \cdot w'. \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

Der Unterschied zwischen der elektromotorischen Kraft und der Klemmenspannung einer Stromquelle (der Spannungsverlust im Stromerzeuger) ist gleich dem Produkte aus dem inneren Widerstande der Stromquelle und der Stromstärke.

Man erkennt sofort, dass der Spannungsverlust im Stromerzeuger um so kleiner ausfällt, die nutzbare Klemmenspannung daher um so höher wird, je kleiner der innere Widerstand w′ des Stromerzeugers wird. Daraus folgt die praktische Regel, dass man sich immer bemühen wird, den inneren Widerstand eines Stromerzeugers so klein zu machen, wie die Umstände dies irgend gestatten. Ausserdem aber lehrt ein Blick auf die Fig. 3, dass der Unterschied zwischen elektromotorischer Kraft und Klemmenspannung auch von dem äusseren Widerstande abhängig ist und um so kleiner ausfällt, je grösser der äussere Widerstand w″ des Stromkreises wird. Für $w'' = \infty$, d. h. bei offenem Stromkreise, ist die Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft.

Die Klemmenspannung ist bei verschiedenen Stromstärken um so weniger veränderlich, je geringer der innere Widerstand w′ des Stromerzeugers ist.

17. Potentialdifferenz, Spannungsunterschied, elektromotorische Kraft.

Da vielfach Verwechselungen zwischen den in der Überschrift genannten Begriffen vorkommen, ist es ratsam, das Wesen dieser Grössen genauer festzustellen.

Jede Ursache, durch welche die Entstehung eines elektrischen Potentialunterschiedes veranlasst wird, nennen wir elektromotorische Kraft. Die chemische Thätigkeit an den Platten eines galvanischen Elementes erzeugt z. B. dauernde Potentialunterschiede vorzugsweise an der Zinkplatte, die sich in der Flüssigkeit des Elementes auflöst. Wenn ferner Leiterteile Kraftlinienfeldern von wechselnder Dichte ausgesetzt sind, treten ebenfalls elektromotorische Kräfte auf.

Potentialunterschiede aber treten, wie wir gesehen haben, nicht nur an dem Sitze elektromotorischer Kräfte auf, sondern dieselben sind auch zwischen allen verschiedenen Stellen eines vom Strome durchflossenen Leiters vorhanden.

Der höchste Potentialunterschied, welcher ausserhalb eines gegebenen Stromerzeugers auftreten kann, z. B. der Potentialunterschied an den beiden Platten eines galvanischen Elementes, der Potentialunterschied an der Eintritts- und Austrittsstelle des Stromes einer elektrischen Maschine, heisst Klemmenspannung.

18. Die praktischen Einheiten und ihr Verhältnis zu den absoluten Masseinheiten.

An den Enden eines Leiters von 1 Ohm Widerstand, der gerade von einem Strome von 1 Ampère durchflossen wird, herrscht ein Potentialunterschied von 1 Volt. Besitzt also ein galvanisches Element, welches durch einen Leiter von 1 Ohm Widerstand geschlossen ist, gerade die Klemmenspannung von 1 Volt, so fliesst durch den so gebildeten Stromkreis ein Strom von 1 Ampère Stärke.

Die meisten dem Daniell-Elemente[1]) verwandten galvanischen Elemente besitzen eine elektromotorische Kraft, die wenig grösser als 1 Volt ist. Da aber der innere Widerstand dieser Elemente meist ziemlich gross ist (er beträgt bei den üblichen Grössen der Elemente gewöhnlich 3—5 Ohm), so ist die Klemmenspannung solcher galvanischer Zellen wesentlich geringer.

Die hier angeführten sind die sogenannten praktischen Einheiten, deren sich die Elektrotechniker bedienen. Dabei ist

1 Volt $= 10^8$ absoluten Einheiten,
1 Ampère $= 10^{-1}$ » »
1 Ohm $= 10^9$ » »

Die absoluten Einheiten des cm, g, sek. (Centimeter, Gramm, Sekunde) Systemes sind ihrer Grösse nach für technische Rechnungen minder geeignet.

---

[1]) Bei einem Daniell-Elemente befindet sich Zink in konzentrierter Lösung von Zinkvitriol, Kupfer in einer Lösung von Kupfervitriol. Die beiden Flüssigkeiten sind durch eine poröse Scheidewand voneinander getrennt.

19. Die Kirchhoff'schen Sätze über Stromverzweigung.

In der Praxis wird ein Stromerzeuger selten seinen Strom nur durch einen einzelnen, einheitlichen Leitungsdraht senden, sondern zumeist wird der Strom in mehrere einzelne Drähte verzweigt. Für diese Fälle hat Kirchhoff zwei Sätze aufgestellt, welche selbst in verwickelten Beispielen die Aufgabe zu lösen gestatten.

I. Kirchhoff'scher Satz. An jeder Verzweigungsstelle ist die algebraische Summe der Stromstärken gleich Null, wenn man die nach der Verzweigungsstelle gerichteten Ströme positiv und die von derselben fortfliessenden Ströme negativ rechnet.

In nebenstehendem Bilde (Fig. 4) sind z. B. die nach dem Knotenpunkte A hinfliessenden Ströme i_1, i_3, i_4 positiv, die von A fortfliessenden Ströme i_2 und i_5 aber negativ zu rechnen; es ist somit:

$$i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0, \text{ oder}$$
$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5.$$



Fig. 4. Stromverzweigung an einem Knotenpunkte.

Die Richtigkeit dieses Satzes ist ohne Weiteres einzusehen, denn würde mehr Elektrizität nach A hingeführt, wäre $i_1 + i_3 + i_4 > i_2 + i_5$, so würde in A eine Anhäufung freier positiver Elektrizität stattfinden. Würde aber von A mehr Elektrizität abgeführt, als dorthin gelangt, so würde sich der elektrische Zustand im entgegengesetzten Sinne ändern, was ebenfalls eine Zustandsänderung bedingen würde, die nicht angenommen werden darf.

II. Kirchhoff'scher Satz. In jedem in sich geschlossenen Stromkreise ist die Summe der elektromotorischen Kräfte gleich der Summe der Produkte aus den Stromstärken mit den Widerständen der einzelnen Strecken. Dabei müssen stets die in demselben Sinne thätigen elektromotorischen Kräfte und Ströme mit dem gleichen, entgegengesetzt wirkende mit entgegengesetzten Vorzeichen gerechnet werden.

Der erste Satz ist eine selbstverständliche Folge der Voraussetzung, dass der Zustand des Punktes sich nicht verändern soll. Der zweite Satz ist streng genommen nur eine Erweiterung des Ohm'schen Gesetzes.

Einige Beispiele werden den Inhalt dieser Sätze ausreichend klar machen.

20. Stromquelle mit einfach verzweigtem Stromkreise.

Die Stromquelle Cu Zn liefert einen Strom von der Stärke J, der in der Richtung, die der Pfeil andeutet, zunächst ungeteilt bis A fliesst. In A teilt sich der Strom in zwei Teile. Der eine Teil, dessen Stromstärke wir mit i_1 bezeichnen wollen, fliesst durch den oberen Leiter, der einen Widerstand w_1 besitzt; der andere Teil des Stromes von der Stärke i_2 fliesst durch den anderen Draht, dessen Widerstand w_2 Ohm betragen mag. In B vereinigen sich dann wieder beide Ströme und gelangen zur Stromquelle Cu Zn zurück. Der Widerstand der Stromquelle Cu Zn und der beiden Teile des Strom-

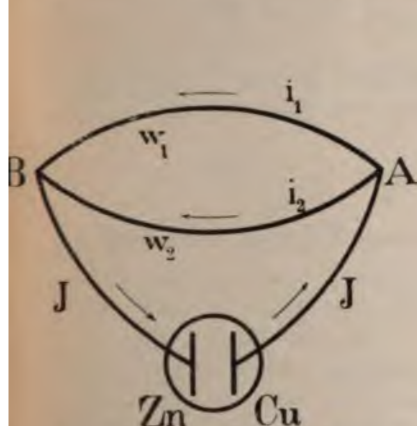


Fig. 5. Zweifache Stromverzweigung.

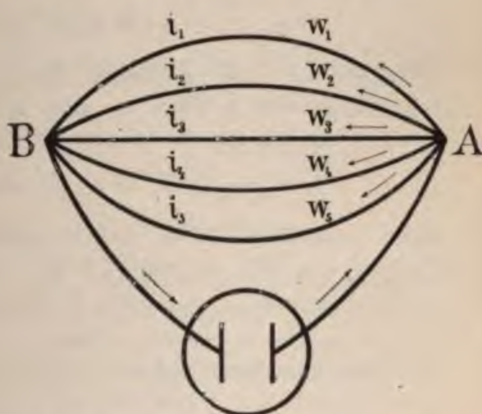


Fig. 6. Fünffache Stromverzweigung

kreises, die ungeteilt sind, A Cu und B Zn, möge zusammen W betragen (vergl. Fig. 5). Zunächst haben wir nach dem ersten Kirchhoff'schen Satze sowohl am Knotenpunkte A, als an B

$$J - i_1 - i_2 = 0, \text{ oder } J = i_1 + i_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

Die Summe der Stromstärken in den Zweigen ist somit gleich der Stromstärke im ungeteilten Leiter.

Betrachten wir jetzt den in sich geschlossenen Stromkreis von A über w_1 nach B und von da über w_2 nach A zurück, in welchem elektromotorische Kräfte nicht vorkommen. Nach dem zweiten Kirchhoff'schen Satze ist

$$i_1 \cdot w_1 - i_2 \cdot w_2 = 0, \text{ oder } i_1 \cdot w_1 = i_2 \cdot w_2,$$

Diese Produktengleichung kann man auch als Proportion schreiben, wie folgt:

$$i_1 : i_2 = w_2 : w_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Dies ergiebt den Satz: Die Stromstärken in den beiden Leiterzweigen sind den Widerständen derselben umgekehrt proportional.

Derselbe Satz bleibt übrigens auch bestehen, wenn zwischen A und B der Strom nicht nur in zwei, sondern in beliebig viele Teile geteilt wird.[1])

Nunmehr betrachten wir den ebenfalls in sich geschlossenen Stromkreis von A über w_1 nach B, von B nach der Stromquelle und von dieser nach A zurück. Bezeichnen wir die elektromotorische Kraft der Stromquelle mit E, so haben wir nach dem zweiten Kirchhoff'schen Satze:

$$w_1 \cdot i_1 + J \cdot W = E, \text{ oder } i_1 = \frac{E - J \cdot W}{w_1}.$$

Wenden wir aber denselben Satz auf den in sich geschlossenen Stromkreis von A über w_2 nach B, von da über die Stromquelle nach A zurück an, so erhalten wir:

$$w_2 \cdot i_2 + J \cdot W = E, \text{ oder } i_2 = \frac{E - J \cdot W}{w_2}.$$

Setzt man diese für i_1 und i_2 gefundenen Werte in die Gleichung $J = i_1 + i_2$ ein, so ergiebt sich:

$$J = \frac{E - J \cdot W}{w_1} + \frac{E - J \cdot W}{w_2}.$$

Bestimmt man hieraus J, so findet man:

$$J = \frac{E \cdot (w_1 + w_2)}{w_1 \cdot w_2 + W \cdot w_1 + W \cdot w_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 13)$$

Wenn man diesen Wert von J in die Gleichungen für i_1 und i_2 einsetzt und etwas umformt, bekommt man:

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \frac{E \cdot w_2}{w_1 \cdot w_2 + W \cdot w_1 + W \cdot w_2} \\ i_2 &= \frac{E \cdot w_1}{w_1 \cdot w_2 + W \cdot w_1 + W \cdot w_2} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 14)$$

Nennt man den Widerstand des gesamten Leiterkreises, den der Strom zu überwinden hat, R, so hat man nach dem Ohm'schen Gesetze:

[1]) Liegen z. B. zwischen A und B fünf Leiter mit den Widerständen w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, und sind die Stromstärken in diesen Zweigen entsprechend i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, so findet man durch die Anwendung der beiden Kirchhoff-schen Sätze auf ähnliche Weise wie vorher:

$$J = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5, \text{ und}$$

$$i_1 : i_2 : i_3 : i_4 : i_5 = \frac{1}{w_1} : \frac{1}{w_2} : \frac{1}{w_3} : \frac{1}{w_4} : \frac{1}{w_5}.$$

$$J = \frac{E}{R} \text{ und folglich } R = \frac{E}{J},$$

oder, wenn man für J den oben in Gleichung 13 gefundenen Wert einsetzt:

$$R = \frac{w_1 \cdot w_2 + W \cdot w_1 + W \cdot w_2}{w_1 + w_2} = \frac{w_1 \cdot w_2}{w_1 + w_2} + W.$$

Zieht man W von R ab, so erhält man den Widerstand w, den die beiden verzweigten Stromzweige w_1 und w_2 zusammen dem Strome entgegensetzen. Der Widerstand w des verzweigten Leiters ist somit:

$$w = \frac{w_1 \cdot w_2}{w_1 + w_2},$$

oder, wenn man die reciproken Werte der beiden Seiten der Gleichung gleich setzt:[1])

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 15)$$

21. Anwendungen der Kirchhoff'schen Sätze.

Nebenschlüsse (Shunt). Sehr häufig ist es nicht angängig, einen Strom, dessen Stärke gemessen werden soll, unmittelbar durch einen gegebenen Messapparat hindurchzuschicken, weil das Instrument durch den zu starken Strom beschädigt werden könnte. In solchen Fällen schickt man nur einen bekannten Bruchteil des Stromes durch das Messinstrument und bewerkstelligt dies dadurch, dass man durch einen Widerstand, Nebenschluss (auch shunt) genannt,

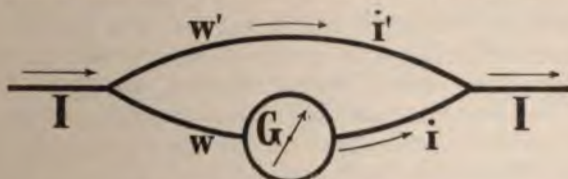


Fig. 7. Gebrauch des Nebenschlusses bei Strommessungen.

den man zwischen die Klemmen des Apparates schaltet, den grösseren, bekannten Bruchteil des zu messenden Stromes fliessen lässt. (Vergl. Fig. 7.)

---

[1]) Sind mehr als zwei, z. B. fünf Verzweigungen zwischen A und B vorhanden, wie in Fig. 6, deren Widerstände w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 Ohm betragen, so ist entsprechend der gesamte Widerstand w der Verzweigung:

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3} + \frac{1}{w_4} + \frac{1}{w_5}.$$

Nennt man J die zu messende Stromstärke im ungeteilten Stromkreise, i die Stromstärke im Strommessapparate, i′ die Stromstärke im Widerstande, den man als Nebenschluss verwendet, ferner w den Widerstand des Galvanometers, w′ den Widerstand des Nebenschlusses, so verhält sich bekanntlich nach der für den Fall der einfachen Stromteilung abgeleiteten Gleichung 12:

$$\frac{i'}{i} = \frac{w}{w'};$$

wenn man auf beiden Seiten der Gleichung 1 addiert, auf gleichen Nenner bringt und beachtet, dass $i + i' = J$ ist, so folgt

$$\frac{J}{i} = \frac{w + w'}{w'}.$$

Soll nun durch den Strommesser nur der n te Teil des zu messenden Stromes J gehen, d. h. will man $i = \frac{1}{n} J$ machen, so ergiebt sich:

$$\frac{J}{\frac{1}{n} J} = \frac{w + w'}{w'}$$

oder, wenn man w′ aus dieser Gleichung berechnet:

$$w' = \frac{1}{n - 1} \cdot w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

Soll also durch einen Strommesser nur $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$, $^1/_{10000}$ des Stromes gehen, so muss der Widerstand des Nebenschlusses gerade $^1/_9$, $^1/_{99}$, $^1/_{999}$, $^1/_{9999}$ des Widerstandes w des Messinstrumentes betragen.

Für manche Fälle ist es von Wert, noch den Einfluss des Nebenschlusses auf die Vorgänge im gesamten Stromkreise zu untersuchen, da im allgemeinen durch die Einfügung desselben der Gesamtwiderstand des Stromkreises und damit unter Umständen, bei gegebener elektromotorischer Kraft, die Gesamtstromstärke J im ungeteilten Stromkreise eine Änderung erfährt.

Nennen wir E die im Stromkreise thätige elektromotorische Kraft und R den Widerstand des gesamten Stromkreises, abgesehen von dem eigenen Widerstande w des Galvanometers, so ist die Stromstärke J, wenn das Galvanometer allein eingeschaltet wird:

$$J = \frac{E}{R + w}.$$

Schaltet man nun aber den Nebenschluss w′ ein, sodass nur der n te Teil des Stromes durch das Galvanometer und $\frac{n-1}{n}$ des

Stromes durch den Nebenschluss geht, so ist, wenn mit r der Widerstand dieser verzweigten Strombahn bezeichnet wird, nach Formel 15):

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{w} + \frac{1}{w'}, \text{ oder } r = \frac{w \cdot w'}{w + w'} = \frac{w \cdot \frac{1}{n-1} \cdot w}{w + \frac{1}{n-1} \cdot w} = \frac{1}{n} \cdot w.$$

Die Stromstärke im ungeteilten Stromkreise würde sich somit ändern und einen Wert J′ annehmen.

$$J' = \frac{E}{R + \frac{1}{n} \cdot w}.$$

Soll die Stromstärke auf den ursprünglichen Wert 3 zurückgehen, so muss vor oder hinter die Verzweigung in den ungeteilten Stromkreis noch ein Ergänzungswiderstand ϱ

$$\varrho = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot w \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 17)$$

eingeschaltet werden.

22. Die Wheatstone'sche Brücke.

Die in nebenstehender Fig. 8 aufgezeichnete Anordnung der Leiter wird häufig verwendet, um elektrische Leitungswiderstände zu messen. Eine grössere Anzahl später zu beschreibender Messapparate für Widerstände beruhen auf dieser Schaltung, und deshalb soll dieselbe hier eingehender besprochen werden.

Wir bezeichnen den Widerstand der Leiterstrecke AB mit w′ und die Stromstärke auf dieser Strecke mit i′, die entsprechenden Grössen auf der Strecke AD mit w″ und i″, auf der Strecke DC mit R und i_R, auf der Strecke BC mit x und i_x, ferner auf der Strecke AC, in die eine Stromquelle eingeschaltet ist, deren elektromotorische Kraft E betragen mag, den Widerstand des Drahtes und der Stromquelle zusammen mit w_E und die Stromstärke in diesem Drahte mit i_E. In die Verbindung der Punkte B und D mag ein

Fig. 8. Schaltung der Wheatstone'schen Brücke.

empfindliches Strommessinstrument G (ein Galvanometer) eingeschaltet sein. Der Widerstand des Drahtes samt demjenigen des Galvanometers mag gleich w_G sein, und die Stromstärke in B G D soll mit i_G bezeichnet werden.

Wir wollen untersuchen, welche Beziehungen zwischen den Widerständen bestehen müssen, damit kein Strom durch das Galvanometer fliesst, also $i_G = 0$ wird.

Wenden wir auf den in sich geschlossenen Stromkreis A B G D A, in welchem keine elektromotorische Kraft vorhanden ist, das zweite Kirchhoff'sche Gesetz an, so erhalten wir:

$$w' \cdot i' + 0 \cdot W_G - w'' \cdot i'' = 0, \text{ oder } w' \cdot i' = w'' \cdot i''.$$

Und wenn wir dasselbe Gesetz auf den in sich geschlossenen Leiterkreis C D G B anwenden, in dem ebenfalls keine elektromotorischen Kräfte auftreten, ergiebt sich:

$$x \cdot i_x - R \cdot i_R + O \cdot W_G = 0, \text{ oder } x \cdot i_x = R \cdot i_R.$$

Durch Division der letzten Formen der beiden Gleichungen erhält man:

$$\frac{w' \cdot i'}{x \cdot i_x} = \frac{w'' \cdot i''}{R \cdot i_R}.$$

Das erste Kirchhoff'sche Gesetz, auf die Verzweigung am Punkte B angewendet, ergiebt:

$$i' - i_x + 0 = 0, \text{ oder } i_x = i';$$

dasselbe Gesetz, auf die Verzweigung am Punkte D angewendet, liefert die Beziehung

$$i'' - i_R + 0 = 0, \text{ oder } i'' = i_R.$$

Wenn man die für i_x und für i'' gefundenen Werte in die vorhergehende Gleichung einführt, erhält man die Grundgleichung der Wheatstone'schen Brücke:

$$\frac{w'}{x} = \frac{w''}{R}, \text{ oder } x = \frac{w'}{w''} \cdot R \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 18)$$

Durch die Leitung, welche das Galvanometer in sich enthält, fliesst somit kein Strom, wenn die vorstehende Proportion erfüllt ist.

Giebt man den Widerständen w' und w'' ein bekanntes Verhältnis, indem man sie entweder gleich gross wählt, oder den einen 10, 100, 1000, oder $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$ mal so gross macht, als den anderen, und wählt man für R einen Widerstand, dessen Grösse jedesmal angegeben werden kann, so kann der Betrag von x in jedem Falle ermittelt werden.[1])

---

[1]) Man vergleiche den Abschnitt über Widerstandsmessung.

23. Zwei verschiedene Stromerzeuger arbeiten in Parallelschaltung auf einen gemeinsamen Stromkreis.

Der Einfachheit wegen nehmen wir zunächst an, wir hätten es mit zwei galvanischen Elementen zu thun, die sich in zwei Zweigen eines geteilten Leiters befinden und Strom in derselben Richtung durch den ungeteilten Leiter zu senden bestrebt sind, wie dies die nebenstehende Abbildung 9 erläutert.

Den Widerstand und die Stromstärke im ungeteilten Leiterkreise zwischen A und B in Fig. 9 bezeichnen wir mit W und J, dieselben Grössen und die elektromotorische Kraft des Stromerzeugers in dem einen Zweige, der A und B verbindet, mit w′, i′ und E′, und dieselben Grössen in dem anderen Zweige mit w″, i″ und E″.

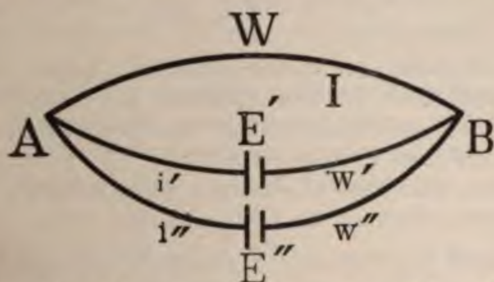


Fig. 9. Zwei parallelgeschaltete Stromquellen arbeiten auf denselben Widerstand.

Zunächst ergiebt das erste Kirchhoff'sche Gesetz, auf den Punkt A oder auf B angewendet:

$$J = i' + i''.$$

Das zweite Kirchhoff'sche Gesetz, angewendet auf den in sich geschlossenen Leiterkreis A über W nach B, von da über E′ nach A zurück, liefert:

$$W \cdot J + w' \cdot i' = E', \text{ oder } i' = \frac{E' - W \cdot J}{w'}.$$

Dasselbe Gesetz für den Leiterkreis von A über W nach B, von da über E″ nach A zurück, giebt:

$$W \cdot J + w'' \cdot i'' = E'', \text{ oder } i'' = \frac{E'' - W \cdot J}{w''},$$

und hieraus folgt:

$$J = \frac{E' - W \cdot J}{w'} + \frac{E'' - W \cdot J}{w''}.$$

Aus dieser Gleichung berechnen wir

$$J = \frac{E' w'' + E'' w'}{w' \cdot w'' + W \cdot (w' + w'')}.$$

Ist in einem besonderen Falle $E' = E''$, $w' = w''$, d. h. sind die beiden parallel geschalteten Stromerzeuger einander gleich, so findet man

$$J = \frac{2 \cdot E' \cdot w'}{w'^2 + 2\,W \cdot w'} = \frac{E'}{\frac{w'}{2} + W},$$

d. h.: Zwei gleiche Elemente in Parallelschaltung wirken wie ein einzelnes Element derselben Art, dessen innerer Widerstand die halbe Grösse hat.[1])

Für n gleiche, parallel geschaltete Elemente ergiebt sich auf dieselbe Weise die Formel:

$$J = \frac{E'}{\frac{w'}{n} + W} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 19)$$

Gleiche Elemente in Parallelschaltung zeigen somit dieselbe elektromotorische Kraft wie ein Element; der innere Widerstand der Batterie ist jedoch nur der n te Teil von dem Widerstande, den ein einzelnes der gleichen Elemente besitzt.

Wir kehren jetzt zum allgemeinen Falle zurück und setzen den für J gefundenen Wert in die Gleichung für i'' ein.

$$i'' = \frac{E'' - \frac{W E' w'' + W E'' w'}{w' \cdot w'' + W\,(w' + w'')}}{w''}.$$

Hat man es mit zwei gleichen Stromerzeugern, z. B. zwei gleichen Dynamomaschinen, zu thun, deren innere Widerstände gleich sind, von welchen aber der eine eine grössere elektromotorische Kraft giebt, als der andere (wenn z. B. die eine Dynamomaschine etwas rascher läuft, als die andere), sei also $w' = w''$ und $E'' = n \cdot E'$, so ist

$$J = \frac{E' \cdot (n + 1)}{w' + 2\,W},$$

$$i'' = \frac{n\,E' - W \cdot \frac{E' \cdot (n + 1)}{w' + 2\,W}}{w'} = E' \, \frac{n + \frac{W}{w'}\,(n - 1)}{w' + 2\,W}.$$

Es wird nun $i'' = J$, d. h. der Stromerzeuger, dessen elektromotorische Kraft E'' ist, liefert den Strom im äusseren Stromerzeuger

---

[1]) Hierbei ist stillschweigend vorausgesetzt, was in der Praxis zumeist durchaus zutrifft, dass die Widerstände der Drahtstücke E A und E B, welche die gleichen Elemente mit den Enden A und B des ungeteilten Widerstandes W verbinden, gegen die inneren Widerstände der Elemente vernachlässigt werden können.

allein, und der andere Stromerzeuger ist vollständig wirkungslos, seine Stromstärke $i' = 0$, wenn

$$n = \frac{w' + W}{W} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 20)$$

ist.

Man erkennt sofort, dass n grösser als 1 ist, und dass, wenn $n > \frac{w' + W}{W}$ ist, i' negativ wird.

Die Parallelschaltung von zwei gleichen Stromerzeugern kann demnach, zumal wenn deren innerer Widerstand w' klein und der äussere Widerstand W verhältnismässig gross ist, leicht dazu führen, dass ein Stromerzeuger viel mehr Arbeit leistet als der andere, oder dass sogar durch den, dessen elektromotorische Kraft kleiner ist, ein entgegengesetzt gerichteter Strom, ein sogenannter Rückstrom, fliesst.

Bei Parallelschaltung von Akkumulatoren und Dynamomaschinen, deren innere Widerstände meist gering sind, und deren elektromotorische Kräfte leicht verschieden werden hönnen, mahnt somit das Ergebnis dieser Betrachtung zur Vorsicht.

24. Schaltungen mehrerer gleichartiger Elemente.

a) Hintereinanderschaltung oder Reihenschaltung.

(auch Schaltung auf Spannung genannt).

Als weitere Anwendung des zweiten Kirchhoff'schen Gesetzes behandeln wir zunächst den Fall, dass n gleiche Elemente in einem ungeteilten Stromkreise hintereinander geschaltet werden. Hat jedes dieser Elemente die elektromotorische Kraft E und den inneren Widerstand w, und werden ferner dieselben Elemente durch eine Leitung von dem Widerstande W geschlossen, während angenommen werden soll, dass zwischen den einzelnen Elementen keine Widerstände von merklicher Grösse vorkommen, so ergiebt das zweite Kirchhoff'sche Gesetz:

$$W \cdot J + n \cdot w \cdot J = n \cdot E, \text{ oder } J = \frac{n \cdot E}{W + n \cdot w} \quad . \; . \quad 21)$$

Man sieht, dass, wenn man n Elemente hintereinander schaltet, sodass alle von demselben Strome durchflossen werden, der auch durch den äusseren Leitungsdraht fliesst, zwar die elektromotorische Kraft n mal so gross geworden ist, dass aber auch der innere Widerstand der als Stromerzeuger dienenden Batterie die n fache Grösse des Widerstandes eines einzelnen Elementes besitzt.

b) Parallelschaltung.

Wenn m gleiche Elemente parallel, d. h. so geschaltet werden, dass durch jedes einzelne Element nur der m te Teil des Stromes i fliesst, der den äusseren Leitungsdraht durchströmt, so ist, wie wir schon vorher gefunden hatten (vergl. Gl. 19):

$$i = \frac{E}{W + \frac{1}{m} w}.$$

c) Gruppenschaltung oder Vereinigung beider Schaltungsweisen (Reihenparallelschaltung).

Besteht eine Batterie aus einer grösseren Zahl galvanischer Elemente derselben Art mit der elektromotorischen Kraft E und dem inneren Widerstande w, so können die vorerwähnten beiden Schaltungsweisen vereinigt werden. Hat man z. B. im ganzen $N = m \cdot n$ Elemente, so kann man immer je m Elemente durch Parallelschaltung zu einer Gruppe vereinigen und dann die vorhandenen n Gruppen hintereinander schalten. Alsdann ist nach b) die elektromotorische Kraft jeder Gruppe E, ihr Widerstand aber nur $\frac{w}{m}$. Durch Hintereinanderschaltung dieser n Gruppen wird die EMK[1]) n mal so gross, also $n \cdot E$, und der innere Widerstand ebenfalls n mal vergrössert, demnach $= n \cdot \frac{w}{m}$. Die Stromstärke J im äusseren Stromkreise vom Widerstande W wird somit

$$J = \frac{n \cdot E}{W + \frac{n \cdot w}{m}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 22)$$

Auf dasselbe Ergebnis wäre man gekommen, wenn man zunächst durch Hintereinanderschaltung von je n Elementen m Gruppen gebildet hätte. Die EMK jeder solchen Gruppe wäre nach a) alsdann $n \cdot E$, der innere Widerstand jeder derselben $n \cdot w$ gewesen. Hätte man nunmehr diese m Gruppen parallel geschaltet, so wäre nach Fall b) die EMK ungeändert, also $n \cdot E$ geblieben, der innere Widerstand $n \cdot w$ aber hätte sich auf seinen m ten Teil, auf $\frac{n \cdot w}{m}$, verringert, und die Stromstärke im äusseren Leiter wäre wieder wie oben, J ge-

[1]) Um nicht das lange Wort »elektromotorische Kraft« stets wiederholen zu müssen, wollen wir von jetzt ab dasselbe durch die drei Buchstaben EMK ersetzen.

blieben. Der Nenner dieses Bruches nimmt seinen kleinsten Wert an, und der Bruch selbst, d. h. die Stromstärke J, erhält bei beliebig wählbaren m und n, für ein gegebenes $N = n \cdot m$, seinen grössten Wert, wenn

$$W = \frac{n \cdot w}{m} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 23)$$

wird, d. h. man erhält bei gegebenem äusseren Widerstande W mit einer bestimmten Elementenzahl $N = m \cdot n$ die grösstmögliche Stromstärke, wenn man die Schaltung der Elemente so wählt, dass der innere Widerstand $\frac{n \cdot w}{m}$ der Batterie möglichst nahe gleich dem äusseren Widerstande W wird.

Für praktische Aufgaben kommt vielfach nicht nur die Grösse der Stromstärke, sondern das Verhältnis der Nutzleistung der Batterie zur Gesamtleistung in Betracht. Dieser Quotient wird das Güteverhältnis genannt (vergl. Kap. II, Abschn. 5, S. 38). Ein Teil der Leistung der Batterie geht nämlich in der Batterie selbst verloren; nur der Rest steht im äusseren Stromkreise zur Verfügung. Diese beiden Teile verhalten sich wie die Widerstände.

Das Güteverhältnis γ ist daher bei Reihenparallelschaltung gleich:

$$\gamma = \frac{W}{W + \frac{n}{m} \cdot w} = \frac{1}{1 + \frac{n}{m} \cdot \frac{w}{W}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 24)$$

Die gemischte Schaltung ist demnach um so vorteilhafter, je kleiner der Wert $\frac{n}{m} \cdot \frac{w}{W}$ ist.

Man erhält, wie oben angegeben worden ist, die grösstmögliche Stromstärke, wenn $W = \frac{n\,w}{m}$ wird. In diesem Falle wird $\gamma = \frac{1}{2}$.

Im Falle praktischer Anwendung ist diese Schaltung unwirtschaftlich, da die Hälfte der erzeugten elektrischen Energie in der Batterie selbst verbraucht werden würde.

Multipliziert man in Gleichung 24) Zähler und Nenner mit J, so ist $J \cdot W$ die Klemmenspannung e der Batterie; der Ausdruck $J \cdot (W + \frac{n}{m} w)$ aber ist nach Gleichung 22) gleich n E. Man erhält somit auch:

$$\gamma = \frac{e}{n\,E} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 25)$$

Die Aufgabe, die in der Praxis am häufigsten auftritt, lautet: Wie viel Stück einer gegebenen Art von Elementen und welche Schaltung derselben muss verwendet werden, um eine bestimmte Klemmenspannung e bei einer vorgeschriebenen Stromstärke J und einem bestimmten Güteverhältnis γ zu erhalten. Alsdann ist E und w durch die Art der Elemente, das Güteverhältnis γ, die Klemmenspannung e und die Stromstärke J durch die Aufgabe festgestellt.

Zunächst ist nach Gleichung 24) und 25):

$$\gamma = \frac{W}{W + \frac{n}{m} \cdot w} \text{ und } \gamma = \frac{e}{n \cdot E}.$$

Aus der letzten Gleichung erhält man sofort:

$$n = \frac{e}{\gamma \cdot E} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 26)$$

aus der vorletzten dagegen:

$$\frac{n}{m} = \frac{W\left(\frac{1}{\gamma} - 1\right)}{w}$$

folglich:

$$m = \frac{w \cdot e}{W \cdot (1 - \gamma) \cdot E} = \frac{w \cdot J}{E \cdot (1 - \gamma)} \quad \ldots \quad 27)$$

und schliesslich:

$$N = n \cdot m = \frac{w \cdot J \cdot e}{E^2 \cdot (1 - \gamma) \cdot \gamma} \quad \ldots \ldots \quad 28)$$

Für reine Reihenschaltung ist m = 1, für reine Parallelschaltung n = 1 zu setzen.

Beispiel. In einem Drahte, dessen Widerstand 3 Ohm beträgt, will man mit 6 Leclanché-Elementen, deren jedes eine EMK von 1,3 Volt und einen inneren Widerstand w = 5 Ohm besitzt, einen möglichst starken Strom erzeugen.

Schaltet man alle 6 Elemente nach a) hintereinander, so wäre der innere Widerstand der Batterie gleich $6 \times 5 = 30\ \omega$, also viel grösser als der äussere Widerstand. Schaltet man aber nach b) alle Elemente parallel, so wäre der Widerstand der Batterie $\frac{5}{6}\ \omega$, also kleiner als der äussere Widerstand von 3 ω. Schaltet man je 3 Elemente parallel und die beiden Gruppen hintereinander, so beträgt der innere Widerstand der Batterie $\frac{2 \cdot 5}{3} = 3\frac{1}{3}\ \omega$. Wenn aber 3 Gruppen von je 2 parallel geschalteten Elementen hintereinander geschaltet würden, so wäre der innere Widerstand der Batterie $\frac{3 \times 5}{2} = 7\frac{1}{2}\ \omega$, also bereits wieder viel zu gross. Es ist hiernach kein Zweifel, dass wir die an vorletzter Stelle erwähnte Schaltung, hintereinander 2 Gruppen von je 3 parallel geschalteten Elementen, als die vorteilhafteste wählen würden.

Die Stromstärken in den einzelnen Fällen gestalten sich wie folgt:

1. Alle 6 Elemente sind hintereinander geschaltet.

Innerer Widerstand $6 \times 5 = 30\ \omega$, EMK $6 \times 1{,}3 = 7{,}8$ Volt,

$$\text{Stromstärke } J = \frac{6 \cdot 1{,}3}{3 + 6 \cdot 5} = 0{,}24 \text{ A.}$$

2. Je 3 Elemente sind hintereinander, diese beiden Elementgruppen parallel geschaltet.

Innerer Widerstand $\frac{3 \times 5}{2} = 7\frac{1}{2}\ \omega$, EMK $3 \times 1{,}3 = 3{,}9$ Volt,

$$\text{Stromstärke } J = \frac{3 \cdot 1{,}3}{3 + \frac{3 \cdot 5}{2}} = 0{,}37 \text{ A.}$$

3. Je 2 Elemente sind hintereinander, diese 3 Gruppen parallel geschaltet.

Innerer Widerstand $\frac{2 \times 5}{3} = 3\frac{1}{3}\ \omega$, EMK $2 \times 1{,}3 = 2{,}6$ Volt,

$$\text{Stromstärke } J = \frac{2 \cdot 1{,}3}{3 + \frac{2 \cdot 5}{3}} = 0{,}41 \text{ A.}$$

4. Alle 6 Elemente sind parallel geschaltet.

Innerer Widerstand $\frac{5}{3} = 1{,}67\ \omega$, EMK $1 \times 1{,}3 = 1{,}3$ Volt,

$$\text{Stromstärke } J = \frac{1{,}3}{3 + \frac{5}{6}} = 0{,}34 \text{ A.}$$

d) Ermittelung der Anzahl Elemente, die für eine gewünschte Stromstärke erforderlich sind.

In der Praxis kommt häufig noch die Frage vor, wie viele Elemente und in welcher Schaltung man dieselben anwenden muss, um in einem gegebenen äusseren Widerstande W eine verlangte Stromstärke J mit der geringsten Elementezahl zu erreichen. Ersetzt man m durch $\frac{N}{n}$, so nimmt die Formel 22) für J die Gestalt an:

$$J = \frac{n \cdot E}{W + \frac{w \cdot n^2}{N}} .$$

Berechnet man hieraus N, so findet man

$$N = \frac{n^2 \cdot w}{\frac{n \cdot E}{J} - W} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 29)$$

Man erkennt sofort, dass $n > \frac{W \cdot J}{E}$ sein muss, da N nicht negativ werden kann. Man erhält für N den kleinsten Wert, wenn $n = \frac{2\,W \cdot J}{E}$ wird.

Ergiebt sich für n keine ganze Zahl, so wird man für n die nächste ganze Zahl wählen (oder, wenn zwei Werte für n dasselbe N liefern, die grössere von beiden, weil diese das günstigere Güteverhältnis liefert); aus dem für n gefundenen Werte wird mit Hilfe obiger Gleichung 29) alsdann N bestimmt.

Beispiel. Mit Bunsen-Elementen, deren jedes eine EMK von 1,8 Volt und einen inneren Widerstand von $\frac{1}{4}$ Ohm besitzt, will man ein Bogenlicht von 10 Ampère erzeugen. Wie viele Elemente braucht man, und in welcher Schaltung verwendet man dieselben?

Da ein Bogenlicht von 10 Ampère am besten bei 45 Volt Spannung zwischen den Kohlen brennt, ist nach dem Ohm'schen Gesetze der scheinbare Widerstand W dieses Bogenlichtes

$$W = \frac{e}{J} = \frac{45}{10} = 4{,}5\ \omega.$$

Man wählt nun:

$$n = \frac{2\,W \cdot J}{E} = \frac{2 \times 4{,}5 \times 10}{1{,}8} = 50.$$

Damit findet man

$$N = \frac{2500 \times \frac{1}{4}}{\frac{50 \times 1{,}8}{10} - 4{,}5} = 138{,}9.$$

Da 50 in 138,9 nicht aufgeht, würde man 150 Elemente wählen und diese zu je dreien parallel schalten.

Das Güteverhältnis wäre im vorliegenden Falle nach Gleichung 24)

$$\gamma = \frac{4{,}5}{4{,}5 + \frac{50}{3} \cdot \frac{1}{4}} = 0{,}52.$$

Beispiel 2. Wie viele Elemente der im vorigen Beispiel bezeichneten Art sind in dem angegebenen Falle erforderlich, wenn das Güteverhältnis ungefähr 0,8 betragen soll?

Nach Gleichung 26) ist:

$$n = \frac{45}{0{,}8 \cdot 1{,}8} = 31\ \text{(rund)}.$$

Ferner ist nach Gleichung 27)

$$m = \frac{0{,}25 \cdot 10}{1{,}8 \cdot 0{,}2} = 7\ \text{(rund)}.$$

Demnach ist:

$$N = m \cdot n = 217.$$

Das Güteverhältnis γ wäre nach Gleichung 25):

$$\gamma = \frac{45}{31 \cdot 1{,}8} = 0{,}81.$$

Die Klemmenspannung e wäre:

$$e = n \cdot E - \frac{n \cdot w}{m} \cdot J = 31 \cdot 1{,}8 - \frac{31 \cdot 0{,}25}{7} \cdot 10 = 44{,}7\ \text{Volt}.$$

II. Kapitel.

Die Wärmewirkungen des elektrischen Stromes.

1. Das Joule'sche Gesetz.

Es ist eine aus der Erfahrung des täglichen Lebens bekannte Thatsache, dass Wärme entwickelt wird, wenn eine Kraft einen Widerstand überwindet.

Jeder Körper setzt dem Durchgange des elektrischen Stromes einen gewissen Widerstand entgegen, und in dem Körper wird infolge des Durchganges des Stromes Wärme entwickelt.

Durch den Versuch hat Joule gezeigt, dass die in der Zeiteinheit entwickelte Wärmemenge dem Produkte aus der zweiten Potenz der Stromstärke und dem Widerstande proportional ist.

$$q = A \cdot i^2 \cdot w.$$

Wenn der Strom aber nicht nur eine, sondern t Sekunden lang durch den Leiter fliesst, so ist die in diesem Zeitraume insgesamt entwickelte Wärmemenge Q

$$Q = A \cdot i^2 \cdot w \cdot t \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Der Koëffizient A ist nahezu 0,24 (vergl. wegen dieses Zahlwertes Kapitel II, Abschnitt 4, S. 37, Gl. 8), wenn die Stromstärke in Ampère, der Widerstand in Ohm, die Zeit t in Sekunden und die Wärmemenge Q in Kalorien[1]) gemessen wird. Das Joule'sche Gesetz kann man auch in noch etwas anderer Form darstellen, wenn man die Beziehung des Ohm'schen Gesetzes zwischen Stromstärke, elektromotorischer Kraft und Widerstand

$$i = \frac{E}{w}$$

berücksichtigt. Hiernach kann man für das Produkt $i \cdot w$ in Formel 1) auch E einsetzen und erhält:

$$Q = 0{,}24 \cdot i \cdot E \cdot t \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

[1]) Unter einer Wärmeeinheit oder einer Kalorie versteht man diejenige Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 *g* Wasser um 1° C. zu erwärmen.



Auf dieser Wärmeentwickelung des elektrischen Stromes beruhen alle Anwendungen desselben in der Beleuchtungstechnik, sowohl das Licht der Glühlampen, als das der elektrischen Bogenlampen und die verschiedenen Methoden, mit dem elektrischen Strome Körper zu erhitzen oder zu schmelzen, Metalle zu löten und zu schweissen.

1. Beispiel: Durch einen Draht, dessen Widerstand 4 Ohm beträgt, fliesst ein Strom von 3 Ampère. Wie gross ist die in einer Minute entwickelte Wärmemenge?

Nach Formel 1) ist:

$$Q = 0{,}24 \cdot 3^2 \cdot 4 \cdot 60 = 518{,}4 \text{ Kalorien.}$$

Die entwickelte Wärmemenge würde somit genügen, um 518,4 *g* Wasser von 0° auf 1° C. zu erwärmen.

2. Beispiel: Eine Glühlampe, die bei 65 Volt Klemmenspannung eine Helligkeit von 16 Normalkerzen entwickelt, verbraucht 0,8 Ampère Strom. Wie viel Wärme entwickelt diese Lampe in einer Stunde?

Nach Formel 2) ist:

$$Q = 0{,}24 \cdot 65 \cdot 0{,}8 \cdot 60 \cdot 60 = 44\,928 \text{ Kalorien.}$$

3. Beispiel: Eine Bogenlampe von 10 Ampère Stromstärke brennt am besten bei 45 Volt Klemmenspannung. Wie gross ist die Wärmemenge, die in einer Minute entwickelt wird?

Nach Formel 2) ist:

$$Q = 0{,}24 \cdot 45 \cdot 10 \cdot 60 = 6480 \text{ Kalorien.}$$

2. Über die praktischen Anwendungen der Stromwärme.

Die vorangehenden Beispiele zeigen, dass die Wärmeentwickelung der elektrischen Lampen verhältnismässig gering ist, wenn man bedenkt, dass z. B. eine Schlitz-Gasflamme von durchschnittlich 14 Kerzen Helligkeit in einer Stunde ungefähr 280 *l* Gas verbraucht und dass dabei eine Wärmemenge von nahezu 1800000 Kalorien entsteht.[1])

Anderseits folgt aus diesen Beispielen, dass, um erhebliche Wärmemengen auf elektrischem Wege, etwa für Heizzwecke, zu entwickeln, sehr starke Ströme erforderlich sind, und eine elektrische Heizanlage in grösserem Umfange nur dann vorteilhaft sein kann, wenn die Erzeugungskosten der Elektrizität sehr gering sind.

Der Vorzug der Erzeugung von Wärme auf elektrischem Wege liegt darin, dass die Wärmeentwickelung auf den vom Strome durchflossenen Leiter beschränkt ist. Der Kohlenfaden der Glühlampe glüht deshalb so stark, weil die Wärme, obgleich sie an sich, wie das soeben gegebene Berechnungsbeispiel 2 gezeigt hat, nicht sehr gross ist, nur die geringe Masse des Kohlenfadens erhitzt; infolgedessen steigt die Temperatur des Kohlenfadens bis auf etwa 1570° C.

---

[1]) Bei Verbrennung von 1 *cbm* Leuchtgas werden ungefähr 6400000 Kalorien entwickelt.

Auch die grosse Helligkeit und der hohe Glanz des elektrischen Bogenlichtes haben darin ihren Grund, dass die Wärmeentwickelung sich auf einen verhältnismässig kleinen Raum und auf wenig Masse beschränkt, dass die Strahlen der weissglühenden Kohle von einer kleinen Fläche ausgesendet werden.

Es giebt eine Anzahl Fälle, in welchen die örtliche Beschränkung der Wärmeentwickelung von besonderem Werte ist. Für kleinere chirurgische Operationen benutzt man z. B. mit Vorliebe Platindrähte oder dünne Platinbleche, die durch den elektrischen Strom für den Augenblick, in welchem die Operation stattfinden soll, dadurch glühend gemacht werden, dass man einen starken elektrischen Strom hindurch sendet. (Galvanokaustik.)

Auch für die verschiedenen elektrischen Löt- und Schweissverfahren ist es von Wert, dass die Wärmeentwickelung ausschliesslich an den Stellen stattfindet, an welchen gearbeitet werden soll.

3. Elektrische Arbeit.

Wir haben früher (Kap. I, 5, S. 4) das elektrische Potential an irgend einer Stelle eines elektrischen Feldes als die Arbeit definiert, welche geleistet werden muss, um eine Elektrizitätsmenge von der Grösse 1[1]) aus unendlicher Ferne an die betreffende Stelle zu bringen. Um eine Elektrizitätsmenge von der Grösse 1 von einer Stelle, an welcher das elektrische Potential den Wert V_1 besitzt, an eine andere Stelle zu bringen, an der das elektrische Potential die Grösse V_2 hat, bedarf es hiernach der Arbeit $V_1 - V_2$. Um eine q mal grössere Elektrizitätsmenge von dem Potential V_1 auf das Potential V_2 zu bringen, ist die Arbeit $q \cdot (V_1 - V_2)$ erforderlich.

Bezeichnet man die Anzahl von Einheiten der Elektrizitätsmenge, die innerhalb des Zeitraumes von 1 Sekunde von dem Potential V_1 auf das Potential V_2 gebracht werden, mit i, so ist $i \cdot (V_1 - V_2)$ die in 1 Sekunde geleistete Arbeit des Stromes von der Stärke i. Führt man für die Potentialdifferenz $V_1 - V_2$, die an zwei Punkten A_1 und A_2 eines vom Strome durchflossenen Leiters herrscht, den Buchstaben e ein (die Differenz zwischen den elektrischen Spannungen in A_1 und A_2), so erhält man für die elektrische Arbeit L, die geleistet wird, den Ausdruck

$$L = i \cdot e \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

[1]) In der Elektrotechnik wird der zehnte Teil des Betrages der Einheit der Elektrizitätsmenge im Centimeter-Gramm-Sekunden-Systeme unter dem Namen Coulomb als Einheit benutzt. Da wir nun 1 Ampère die Stromstärke nennen, bei der in einer Sekunde 1 Coulomb durch jeden Leiter bewegt wird, müssen wir die Stromstärken mit 10 multiplizieren, wenn wir angeben wollen, wie viele Elektrizitätseinheiten des absoluten Systems in jeder Sekunde durch jeden Querschnitt des Leiters bewegt werden.

Nennt man w den Leitungswiderstand, der zwischen den beiden Punkten A_1 und A_2 liegt, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze

$$i = \frac{e}{w} \text{ oder } e = i \cdot w.$$

Führt man dies in die Formel 3) ein, so erhält man

$$L = i^2 \cdot w, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

einen Ausdruck für die geleistete elektrische Arbeit, der bis auf einen konstanten Faktor mit der Formel des Joule'schen Gesetzes (Gleich. 1 und 2) übereinstimmt.

Die Arbeitseinheit, in der in den Ausdrücken 3) und 4) die Grösse L ausgedrückt wird, heisst Voltampère oder Watt.

Das Hundertfache eines Watt wird Hektowatt, der tausendfache Betrag eines Watts Kilowatt genannt.

In Kilowatt wird zumeist die Leistungsfähigkeit elektrischer Starkstromapparate, der elektrischen Maschinen, Elektromotoren, der Transformatoren und der Akkumulatorenbatterien ausgedrückt.

4. Vergleich der elektrischen Arbeitseinheit mit der mechanischen Arbeitseinheit.

Die Einheit der in der Sekunde geleisteten elektrischen Arbeit oder 1 Watt ist infolge der Wahl der praktischen Einheiten gleich 10^7 Arbeitseinheiten im absoluten System oder gleich 10^7 Erg.[1])

$$1 \text{ VA} = 10^7 \text{ Erg} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Ein Ampère ist nämlich der Strom, durch welchen 1 Coulomb, d. i. $^1/_{10}$ einer absoluten Elektrizitätseinheit, in einer Sekunde durch den Querschnitt eines Leiters hindurchgeführt wird; eine Potentialdifferenz von 10^8 absoluten Einheiten nennen wir 1 Volt.

Die praktische Arbeitseinheit der Maschinentechnik ist das Kilogrammmeter. Ein Kilogrammmeter ist die Kraft, welche einer Masse von 1000 *g* in einer Sekunde eine Beschleunigung von 981 *cm* erteilen würde, also gleich einer Kraft von 981000 Dynen. Nun ist 1 *m* = 100 *cm*, somit

$$1 \text{ Kgm} = 981000 \cdot 100 = 9{,}81 \cdot 10^7 \text{ Erg.}$$

Hiernach ist $$10^7 \text{ Erg} = \frac{1}{9{,}81} \text{ Kgm},$$

und somit $$1 \text{ VA} = \frac{1}{9{,}81} \text{ Kgm}, \; 1 \text{ Kgm} = 9{,}81 \text{ VA} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

---

[1]) Eine Kraft, die der Masse von 1 *g* in einer Sekunde eine Beschleunigung von 1 *cm* erteilt, heisst 1 Dyne. Die Arbeit, die geleistet wird, wenn eine Kraft von 1 Dyne längs eines Weges von 1 *cm* wirkt, heisst 1 Erg.

Eine Arbeitsleistung von je 75 Kgm in einer Sekunde nennt man in der Technik eine Pferdestärke; 75 Kgm = 1 Pfst. Danach ist eine Arbeitsleistung von 75 Kgm in jeder Sekunde gleich 75 $\times$ 9,81 = 735,75 oder rund 736 VA. Eine Leistung von je 736 VA oder 736 Watt in jeder Sekunde nennen wir eine elektrische Pferdestärke.

1 Pfst = 736 VA, 1 VA = $\frac{1}{736}$ Pfst, 0,736 Kilowatt = 1 Pfst,
1 Kilowatt = 1,36 Pfst . . . . . . 7)

Die hier mitgeteilten Beziehungen gestatten nunmehr auch die Bedeutung des Zahlenfaktors festzustellen, der im Joule'schen Gesetze (Gleich. 2) vorkommt.

Bekanntlich kann Wärme in Arbeit und umgekehrt Arbeit in Wärme umgewandelt werden. Für diese Umwandlung gilt das durch Joule und andere auf dem Wege des Versuches festgestellte, sogenannte mechanische Wärmeäquivalent. Um durch mechanische Arbeit die Wärmemenge hervorzubringen, die nötig ist, um 1 *kg* Wasser um 1° C. zu erwärmen, ist eine Arbeitsleistung von 425 Kilogrammmeter nötig. Hiernach ist:

$$425 \text{ Kilogrammmeter} = 1000 \text{ Kalorien},$$

1 Kilogrammmeter = $\frac{1000}{425}$ Kalorien, oder 1 Kalorie = 0,425 Kilogrammmeter.

Danach ist

$$1 \text{ Watt} = \frac{1}{9,81} \text{ Kgm} = \frac{\frac{1000}{425}}{9,81} = 0,24 \text{ Kalorien} \quad . \; . \; . \quad 8)$$

Diese Zahl 0,24 ist der Koëffizient, den wir in Gleich. 2) benutzt haben.

Da, wie oben erwähnt, die Leistung von 1 VA in einer Sekunde gleich 10^7 absoluten Arbeitseinheiten ist, sind 10^7 Erg = 0,24 Kalorien, oder

$$1 \text{ Kalorie} = 42 \cdot 10^6 \text{ absolute Arbeitseinheiten} \quad . \; . \; . \quad 9)$$

1. Beispiel: Wie viele Glühlampen, die bei 65 Volt Spannung und 0,8 Ampère Stromverbrauch eine Helligkeit von je 16 Normalkerzen geben, sind auf eine elektrische Pferdestärke (736 VA) zu rechnen?

Eine Glühlampe braucht 65 $\times$ 0,8 = 52 Watt. Somit gehen auf eine Pferdestärke:

736 : 52 = 14 solcher Lampen.

2. Beispiel: Eine Glühlampe (von Siemens & Halske, No. B 2) giebt 200 Normalkerzen, wenn sie bei 100 Volt Spannung mit 5 Ampère Strom gebrannt wird. Wie viel Watt sind für jede Normalkerze Helligkeit nötig?

Die Lampe erhält 5 $\times$ 100 = 500 Watt; für jede Normalkerze Helligkeit werden somit

500 : 200 = 2,5 Watt

verbraucht.

5. Verteilung der Arbeit auf die einzelnen Teile eines Stromkreises, Güteverhältnis.

Wenn ein Stromerzeuger mit einem äusseren Widerstande zusammen einen geschlossenen Stromkreis bildet, so wird die gesamte vom Stromerzeuger in jeder Zeiteinheit geleistete Arbeit, wir wollen diese L nennen, zum Teil im äusseren Stromkreise, zum Teil im Innern des Stromerzeugers selbst verbraucht und in Wärme umgewandelt.

Die überhaupt erzeugte elektrische Arbeit L ist gleich dem Produkte aus der EMK des Stromerzeugers in Volt und der Stromstärke in Ampère.

$$L = E \cdot i \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 10)$$

Die im äusseren Stromkreise verbrauchte elektrische Arbeit L_a ist gleich dem Produkte aus dem Quadrate der Stromstärke und dem äusseren Widerstande w_a.

$$L_a = i^2 \cdot w_a \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 11)$$

Der im Innern des Stromerzeugers verbrauchte Anteil der Arbeit L_i ist somit:

$$L_i = L - L_a, \text{ oder } L_i = E \, . \, i - i^2 \cdot w_a \quad \ldots \quad 12)$$

Hiernach ist:

$$\frac{L_a}{L} = \frac{i^2 \cdot w_a}{i \cdot E}, \quad \frac{L_i}{L} = \frac{i \cdot E - i^2 \cdot w_a}{i \cdot E},$$

oder, wenn man auf den rechten Seiten die Brüche mit i kürzt und für i seinen aus dem Ohm'schen Gesetze folgenden Wert

$$i = \frac{E}{w_a + w_i}$$

einsetzt: $\frac{L_a}{L} = \frac{w_a}{w_a + w_i}$ und $\frac{L_i}{L} = \frac{w_i}{w_a + w_i}$

Den Bruch $\frac{L_a}{L}$ nennt man das Güteverhältnis[1]), weil er angiebt, welcher Teil der vom Stromerzeuger überhaupt hervorgebrachten Arbeit ausserhalb der Stromquelle verbraucht wird.

Man erkennt leicht, dass, weil $L = L_i + L_a$ ist, L_a stets kleiner als L sein muss; $\gamma = \frac{L_a}{L}$ ist somit ein echter Bruch.

Das Güteverhältnis γ wird somit durch folgende Gleichung definiert:

$$\gamma = \frac{L_a}{L} = \frac{w_a}{w_i + w_a} = \frac{e}{E} \quad \ldots \ldots \quad 13)$$

---

[1]) Vergl. Kap. I, Abschn. 24, Gleich. 24, S. 29 u. s. f.

Multiplizieren wir $\gamma = \frac{L_a}{L}$ mit 100, so erhalten wir das Güteverhältnis in Prozenten.

1. **Beispiel:** Ein Stromerzeuger, dessen innerer Widerstand gleich 4 Ohm ist, arbeitet auf einen äusseren Stromkreis, dessen Widerstand 6 Ohm beträgt. Wie gross ist das Güteverhältnis γ in Prozenten?

$$\gamma = \frac{L_a}{L} \cdot 100 = \frac{6}{6+4} \cdot 100 = 60\%.$$

2. **Beispiel:** Man will bei einem Güteverhältnis von 50% einen galvanokaustischen Apparat, der im weissglühenden Zustand einen Widerstand von 0,05 Ohm besitzt und 15 Ampère Strom braucht, mit Elementen betreiben, die eine elektromotorische Kraft von 1,6 Volt und einen inneren Widerstand von 0,4 Ohm besitzen. Wie viele Elemente sind nötig und wie muss man dieselben schalten?

Soll das Güteverhältnis 50% werden, so muss der innere Widerstand der Batterie gleich dem äusseren Widerstande sein, also

$$w_i = 0{,}05\ \omega.$$

Hat man nun N solcher Elemente, die zu je m parallel in n Gruppen hintereinander geschaltet werden, so muss der innere Widerstand der Batterie gleich 0,05 [1]), somit

$$0{,}05 = \frac{n \cdot 0{,}4}{m},\quad m = \frac{n \cdot 0{,}4}{0{,}05}$$

gewählt werden.

Ferner ist i = 15, folglich nach dem Ohm'schen Gesetze:

$$15 = \frac{n \cdot 1{,}6}{\frac{n}{m} \cdot 0{,}4 + 0{,}05},\quad \text{oder } 15 = \frac{n \cdot 1{,}6}{0{,}05 + 0{,}05},$$

$$n = \frac{15 \times 0.1}{1{,}6} = \frac{1{,}5}{1{,}6};$$

Da n nicht kleiner als 1 werden kann, wird n gleich 1 gewählt; man muss alle Elemente parallel schalten. Daraus folgt:

$$m = \frac{n \cdot 0{,}4}{0{,}05} = \frac{1 \cdot 0{,}4}{0{,}05} = 8.$$

Man braucht somit 8 solcher Elemente, die sämtlich parallel geschaltet werden.

Der Strom wird aber dann (vergl. Kap. I, Abschn. 24, Gleich. 22, S. 29):

$$i = \frac{1{,}6}{\frac{0{,}4}{8} + 0{,}05} = 16\ \text{A}.$$

Man wird somit durch Vorschalten von Widerständen vor den galvanokaustischen Apparat die Stromstärke etwas verringern.

Der im Innern des Stromerzeugers verwendete Anteil L_i der gesamten erzeugten Arbeit L setzt sich in Wärme um. Die galvanischen Zellen einer Batterie, ebenso elektrische Maschinen, werden daher warm, wenn sie arbeiten. Um diesen nutzlos in Wärme um-

---

[1]) Vergl. Kap. I, Abschn. 24, Form. 23, S. 29.

gesetzten Teil der erzeugten Arbeit möglichst zu verringern, ist es wünschenswert den Stromerzeugern einen möglichst geringen inneren Widerstand zu geben. Von zwei Stromerzeugern, die im äusseren Stromkreise dieselbe Leistung hervorzubringen imstande sind, ist daher derjenige der vorteilhaftere im Betriebe, der den geringeren inneren Widerstand besitzt.

Ein geringerer innerer Widerstand fordert aber grösseren Materialaufwand; die Elemente müssen grössere Platten haben, die elektrischen Maschinen müssen grössere Abmessungen besitzen, wenn sie einen kleineren inneren Widerstand erhalten sollen. Grösserer Materialaufwand aber bedingt grössere Kosten der Herstellung des Stromerzeugers, und darin liegt meist die natürliche Beschränkung in der Wahl der Abmessungen.

III. Kapitel.

Die Lichtwirkungen des elektrischen Stromes.

1. Die Eigentümlichkeiten des elektrischen Lichtes.

Mit den Wärmewirkungen stehen die Lichtwirkungen der Elektrizität im engsten Zusammenhang, denn bei den Anwendungen von praktischer Bedeutung kommt nur die Lichtentwickelung in Frage, die mit Wärmeerscheinungen Hand in Hand geht.[1])

Wenn man auf irgend welche Weise einen Körper auf immer höhere Temperatur bringt, so sendet er immer mehr Strahlen aus, schliesslich fängt er an zu glühen, d. h. er sendet neben den Wärmestrahlen auch Lichtstrahlen aus, oder besser gesagt, er sendet, wenn er genügend hoch erhitzt worden ist, Strahlenarten aus, die sowohl Wärmeerscheinungen als Lichtempfindungen hervorrufen.

Mit der bei wachsender Temperatur immer mehr zunehmenden gesamten Ausstrahlung ändert sich das Verhältnis der unsichtbaren und der sichtbaren Strahlen. Je höher die Temperatur wird, um so höher wird der Prozentsatz der Lichtstrahlen. Feste und flüssige Körper senden bei gleich hoher Temperatur dabei sehr erheblich mehr Lichtstrahlen aus, als gasförmige.

Der Erhitzung der Körper bis auf solche Wärmegrade, bei welchen verhältnismässig viel Licht ausgesendet wird, steht zumeist der Umstand hinderlich im Wege, dass bei hoher Temperatur die Körper flüssig werden und verdampfen, oder dass wenigstens ihr innerer Zusammenhalt (ihre Kohäsion) sich derart lockert, dass ein Abschleudern von Teilchen des Körpers leicht eintreten kann.

---

[1]) Wir wollen nicht unerwähnt lassen, dass auch Versuche gemacht worden sind, die Erzeugung von Licht auf elektrischem Wege, durch hochgespannte Wechselströme von hoher Frequenz, bei denen nur ganz geringe Erwärmung stattfindet, das Licht Geissler'scher, Tesla'scher und Crookes'scher Röhren, die elektrisch erregte Fluorescenz, Phosphorescenz und Lumeniscenz praktisch zur Anwendung zu bringen. Grosse Erfolge, die auf eine ausgedehnte Anwendung in nächster Zeit schliessen liessen, sind jedoch bis jetzt nicht erzielt worden.

Der elektrische Strom, der durch einen Leiter von geringem Querschnitt fliesst, gestattet eine grosse Wärmemenge in einem kleinen Volumen zu entwickeln und ist daher besonders geeignet, hohe Temperaturen hervorzubringen, bei welchen vorzugsweise viel leuchtende Strahlen ausgesendet werden.

Wenn ein Körper durch den elektrischen Strom zum Leuchten gebracht werden soll, so muss er entweder die Elektrizität selbst leiten, oder auf sonst eine Weise, z. B. durch Abschleuderung kleinster Teile, wie dies z. B. beim Lichtbogen geschieht, Elektrizität zu übertragen imstande sein.

Nach diesen beiden Arten der Elektrizitätsübertragung unterscheidet man Glühlicht und Bogenlicht.

Da die Wärmeentwickelung nach der im vorigen Kapitel (Seite 36) abgeleiteten Gleichung 4) proportional dem Widerstand w wächst, wird man vorzugsweise für die Erzeugung von Licht auf elektrischem Wege auf Körper hingewiesen, die einen hohen elektrischen Leitungswiderstand besitzen. Da man ausserdem die Körper sehr hoch erhitzen können soll, ohne dass ihr Aggregatzustand sich ändert, so wird man ganz von selbst auf Körper, wie Platin und seine chemischen Verwandten und besonders auf Kohle und auf schwer schmelzbare Substanzen hingewiesen, die an sich Nichtleiter sind, aber unter besonderen Umständen eine geringe Leitungsfähigkeit annehmen.

2. Das elektrische Glühlicht.

Die Versuche, durch den elektrischen Strom Platindrähte oder Kohlenfäden glühend zu machen und das ausgesendete Licht praktisch zu verwerten, gehen bis in die vierziger Jahre des 19. Jahrhunderts zurück.[1])

Die zu überwindenden Schwierigkeiten waren aber sehr gross. Platin schien eigentlich allen Ansprüchen zu genügen, aber es schmolz leicht bei hohen Temperaturen, und es zeigte die störende Eigenschaft, dass es schon vor seiner Schmelzung unter der Einwirkung elektrischer Ladungen leicht zerstäubte; auch die Kostspieligkeit infolge der Seltenheit des Platins in der Natur stand einer ausgedehnten technischen Anwendung hinderlich im Wege. Versuche, Platindrähte zu benutzen, sind aber bis in die neueste Zeit fortgesetzt worden.

Wesentlich passender erschienen Kohlenfäden aus Bambus, auf die zuerst Sawyer, Edison, Maxim, Lane Fox, Man ungefähr

[1]) Der Deutsche Heinrich Göbel (geb. 1808 in Springe) hat zuerst im Jahre 1846 elektrische Glühlampen mit Kohlenfäden, ohne Vakuum, konstruiert.

um das Jahr 1878 nahezu gleichzeitig aufmerksam gemacht haben. Aber es zeigte sich, dass bei hohen Temperaturen die Kohle durch den Sauerstoff der Luft rasch verbrannt wurde.

Man wurde durch diese Wahrnehmung darauf geführt, Kohlenfäden, die durch den elektrischen Strom glühend gemacht werden sollen, in einen luftleeren Raum einzuschliessen. Damit wurde aber gleichzeitig der weitere Vorteil erreicht, dass im Vakuum die Wärmeabgabe des Kohlenfadens an die Umgebung durch Wärmeleitung und Wärmefortführung (Konvektion) erheblich vermindert wird, sodass also wesentlich geringere Stromstärken schon genügen, um einen im luftleeren Raum befindlichen Kohlenfaden auf dieselbe hohe Temperatur zu erhitzen, als dies der Fall sein würde, wenn sich der Faden in Luft oder einem anderen Gase befände.

Das hohe Verdienst, zuerst Erfolge von praktischer Bedeutung auf diesem Gebiete errungen und die zahlreichen entgegenstehenden Schwierigkeiten in mühevoller Arbeit siegreich überwunden zu haben, gebührt Thomas Alpha Edison, den man daher allein mit vollem Recht als den Erfinder des elektrischen Glühlichtes bezeichnen kann.[1]) Im Februar des Jahres 1880 veröffentlichte Edison durch F. R. Upton die wesentlichen Grundzüge seiner Erfindung.

Im Mai des Jahres 1880 wurden zuerst auf dem Dampfer Columbia von Edison Glühlampen angewendet; seit dem Jahre 1881 ist diese Art der Beleuchtung alsdann mehr und mehr allgemein in Gebrauch gekommen.

Während man früher aus Bambusfasern (Edison), Papier, gesponnenen Fäden und hohlgewebten Röhren (Bernstein) durch Ausglühen unter Luftabschluss die Kohlenfäden herstellte, werden jetzt fast allgemein aus Kollodium, das mit Essigsäure behandelt worden ist, gepresste Fäden verwendet. Die Fäden werden über eine aus Kohle hergestellte Form (vergl. Fig. 10) gelegt und unter Luftabschluss in einer Muffe geglüht.

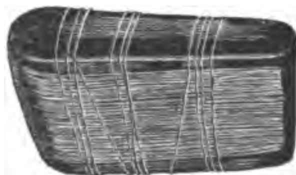


Fig. 10. Glühformen für Kohlenfäden von Glühlampen.

Besondere Schwierigkeit bereitete lange Zeit die Verbindung der Kohlenfäden mit den zur Zuführung des Stromes dienenden Platindrähten. Vielfach wurden früher als Verbindungsstücke dünne Kupferröhrchen verwendet und durch galvanischen

[1]) Nicht darin liegt das eigentliche Verdienst des Erfinders, dass ihm gelegentlich ein praktisch verwertbarer Gedanke beigekommen ist, sondern vielmehr darin, dass er in sorgsamer Arbeit die der nützlichen Verwendung seines Erfindungsgedankens entgegenstehenden Schwierigkeiten mit Erfolg zu überwinden imstande ist. Auch in der Gesetzgebung zum Schutze der Erfindungen kommt dieser Gesichtspunkt mehr und mehr zur Geltung.

Kupferniederschlag auf die Verbindungsstelle ein leitender Zusammenhang hergestellt. Neuerdings wird die Vereinigung zwischen Kohlenfaden und Platindraht vielfach durch einen Kohlenniederschlag bewirkt, der bei hoher Temperatur in Kohlenwasserstoffen erfolgt.

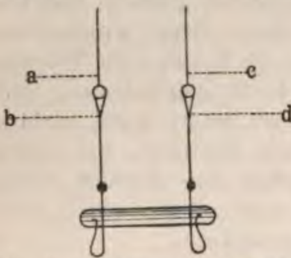


Fig. 11. Befestigung der Kohlenfäden zu Zuleitungsdrähten.

Die beste Verbindung wird jedoch, wie nachstehend, erzielt: Nachdem die Kohle in die Hülsen des Füsschens gesteckt, werden beide in Klemmen gespannt, welche so konstruiert sind, dass sie den Durchgang eines elektrischen Stromes nur von a bis b und c bis d (Fig. 11) gestatten. Die Klemmen werden, nachdem sie mit der elektrischen Leitung in Verbindung gebracht, mit dem Füsschen und der Kohle in flüssigen Kohlenwasserstoff (Benzin, Palmkernöl, Vaselinöl eignen sich sehr gut dazu) gesteckt; dann wird vermittelst eines Stromes von geeigneter Stärke Kohle auf die Verbindungsstellen niedergeschlagen.

Die so niedergeschlagene Kohle (vergl. Fig. 12) gewährt eine innige Verbindung.

Nachdem die in Glasstäbchen eingeschmolzenen Platindrähte mit hervorragenden Enden mit den beiden Enden des Kohlenfadens ver-

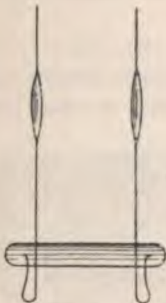


Fig. 12. Form der niedergeschlagenen Kohle.

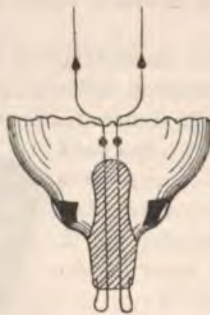


Fig. 13.



Fig. 14.

Einschmelzungsarten bei elektrischen Glühlampen.

einigt worden sind, erhitzt man durch einen durchgesendeten Strom die Fäden wiederholt in einer Atmosphäre von Kohlenwasserstoffen zur Weissglut. Bei Berührung mit dem weissglühenden Kohlenfaden werden die Kohlenwasserstoffe zersetzt (dissoziiert), und es scheidet sich Kohlenstoff in der Form von hartem, dunkelgrauem Graphit auf der Oberfläche des Kohlenfadens aus. Diese Abscheidung ist stärker an den Stellen, die etwas dünner sind, und daher lebhafter glühen. Der sogenannte Karbonisierungsprozess hat also einen doppelten

Zweck, einerseits werden die Fäden mit einer harten, widerstandsfähigen Art des Kohlenstoffs überzogen, anderseits werden geringe Querschnittsunterschiede, die nicht immer ganz zu vermeiden sind, noch völlig ausgeglichen.

Hierauf werden die gläsernen Träger mit den Kohlenfäden in die Glasbirnen eingeschmolzen (vergl. Fig. 13 und Fig. 14), und die Glasgefässe mit der Luftpumpe bis auf Bruchteile eines Millimeters (mindestens 0,2 *mm*) ausgepumpt, während man gleichzeitig, um die im Kohlenfaden absorbierten und die an der inneren Glaswand anhaftenden Gase auszutreiben, den Kohlenfaden durch einen durchgesendeten Strom stark erhitzt. Ist dies geschehen, so wird die Lampe von der Luftpumpe abgeschmolzen und der Teil des inneren Fusses angesetzt, der zur Befestigung in der Fassung dient.[1])

Man hat es für zweckmässig gefunden, den Kohlenfaden auf nicht höhere Temperatur als ca. 1570° C., d. h. bis zur hellen Gelbglut, zu erhitzen; dieser Zustand wird etwa erreicht, wenn für eine Lichtaussendung von 1 Hefnereinheit, je nach der Art des Kohlenfadens, 2,5 bis 3,5 Watt an elektrischer Energie verbraucht werden. Gut gearbeitete Lampen besitzen dabei eine mittlere Lebensdauer von 700 bis 800 Brennstunden.

Lampen mit stärkerer Beanspruchung als etwa 1 Hefner-Einheit für 3 Watt Verbrauch an elektrischer Energie, besitzen eine geringere, und Lampen mit höherem Wattverbrauch für gleiche Lichtstärke eine längere Lebensdauer. Schon wenn der Kohlenfaden auf mehr als 1600° C. erhitzt wird, tritt ein sehr starkes Abschleudern von Kohlenteilchen ein, durch die der Faden geschwächt und die Innenwand der Glasbirne geschwärzt wird.

Von einer Fabrik sehr verbreiteter Lampen werden z. B. über das Verhältnis zwischen Wattverbrauch und Lebensdauer folgende Zahlen angegeben:

Die Lebensdauer der Glühlampen.

Watt	Stunden	Watt	Stunden
1½	45	3½	1000
2	200	4	2500
2½	450	5	5000
3	700		

Aber auch bei normaler Beanspruchung werden von der Oberfläche des Kohlenfadens beim Gebrauch Kohlenteile abgeschleudert, die sich auf der Innenwand der Glasbirne ansetzen. Dadurch nimmt

[1]) Genaueres über die heutige Fabrikation der Glühlampen findet man bei: **Krüger**, Die Herstellung der elektrischen Glühlampe. Leipzig 1894, Oskar Leiner.

der Querschnitt des Fadens ab, der Widerstand zu. Infolgedessen sinkt die Lichtaussendung der Lampe, die ausserdem noch dadurch vermindert wird, dass die Glocke immer mehr und mehr sich bräunt (beblakt) und ein immer grösserer Anteil des Lichtes durch diese Kohlenstoffschicht absorbiert wird.

Über die Abnahme der Ökonomie der Lampen mit der Brenndauer giebt nachstehende Tabelle Auskunft.

Abnahme der Lichtaussendung.

Brenn-stunden	Lampen alte (Bambus) 3,0 Watt		Lampen neue (Cellulose) 3,0 Watt		Lampen alte (Bambus) 3,5 Watt		Lampen neue (Cellulose) 3,5 Watt	
	Kerzen	Watt	Kerzen	Watt	Kerzen	Watt	Kerzen	Watt
0	16	3,00	16	3,09	16	3,50	16	3,55
200	15,6	3,10	15,80	3,12	16	3,50	16	3,55
300	13,2	3,56	15,50	3,16	15,4	3,62	15,95	3,56
400	12,2	3,79	14,80	3,24	14,9	3,73	15,90	3,57
500	11,4	4,05	14,15	3,34	14,5	3,82	15,77	3,59
600	10,4	4,36	13,30	3,48	13,7	4,02	15,44	3,64
700	9,8	4,61	12,33	3,65	13,4	4,09	15,05	3,72
800	9,2	4,70	11,25	3,88	13,3	4,11	14,68	3,78
900	9,0	4,94	10,62	4,10	13,1	4,16	14,12	3,90
1000	8,4	5,27	9,50	4,46	12,5	4,32	13,50	4,04

Eine Änderung der Beanspruchung um 1 % veranlasst bei guten Lampen eine Änderung in der Lichtausstrahlung um 5 bis 6 %.

Während früher für Zwecke der elektrischen Beleuchtung vorzugsweise Lampen benutzt wurden, die für eine unveränderliche Spannung von 65 Volt, 100 Volt, 110 Volt oder 120 Volt bestimmt waren, ist es neuerdings den Glühlampenfabriken gelungen, auch Lampen von gleich guter Ökonomie und nahezu gleicher Lebensdauer für wesentlich höhere Spannungen, 220 Volt, 250 Volt und selbst mehr, herzustellen.

Die Glühlampen werden fast ausschliesslich in reiner Parallelschaltung bei konstanter Spannung betrieben. Für Hintereinanderschaltung, bei der viel an Kosten der Leitung gespart wird, sind besondere Einrichtungen nötig (Kurzschlüsse oder selbstthätige Umschalter), die dem Strom einen anderen Weg öffnen, falls der Kohlenfaden einer Lampe der Reihe durchbrennt.

Durch Veränderung des Querschnittes und der Länge des Fadens kann man Lampen für verschiedene Spannungen und für verschiedene Lichtstärken herstellen. Als Normallampe gilt die Lampe, die bei richtiger Beanspruchung 16 Normalkerzen besitzt. Nicht selten wird sogar die Leistungsfähigkeit elektrischer Centralen oder sonstiger elektrischer Anlagen in Vielfachen dieser Einheit ausgedrückt. Den Energieverbrauch einer Normallampe nimmt man dabei rund zu 50 Watt oder $\frac{1}{20}$ Kilowatt an.

3. Die Vorzüge des elektrischen Glühlichtes.

Der Hauptvorzug des Glühlichtes ist in der fast unbegrenzten Teilbarkeit der elektrischen Energie für Beleuchtungszwecke begründet, die auf diese Weise möglich ist. Ein anderer Vorteil ist die hohe Feuersicherheit, die dadurch bewirkt wird, dass der glühende Kohlenfaden vollkommen in die Glasbirne eingeschlossen ist. Wird durch Stoss oder auf sonst eine Weise die Glashülle zerstört, so brennt der dünne Kohlenfaden sofort durch, wenn er mit der eindringenden Luft in Berührung kommt. Man hat schon wiederholt in Gemischen explosibler Gase brennende Glühlampen zertrümmert, ohne dass sich das Gemisch dadurch entzündet hätte. Die Glashülle guter Glühlampen erhitzt sich bei leidlicher Lüftung auch nicht so hoch, dass benachbarte brennbare Körper dadurch entzündet werden können.

Ferner ist bei dieser Beleuchtungsart jede Luftverderbnis völlig ausgeschlossen.

Das rötlich-gelbliche Licht der Glühlampen erinnert in seiner Färbung an die sonst üblich gewesenen, uns vertrauten Beleuchtungshilfsmittel; durch Glühlicht beleuchtete Räume machen einen warmen, behaglichen und vornehmen Eindruck.

Da die Glühlampe in jeder Lage verwendet werden kann, ist es möglich, den Beleuchtungskörpern, mit voller Freiheit der Gestaltung, ungezwungene, geschmackvolle Formen zu geben, mehr als dies für Lampen anderer Art und Lichter möglich ist.

Ein anderer, sehr hoch anzuschlagender Vorzug, den das Glühlicht auch mit der Bogenlampe gemeinsam hat, der aber der Nernstlampe und sonstigen künstlichen Lichtquellen fehlt, ist der Umstand, dass bei Einschaltung die Lampen sofort in vollem Glanze strahlen, und dass die Einschaltung auch von fernher, von einer oder auch von mehreren (Hôtelschalter) bequem gelegenen Stellen aus erfolgen kann. Mit elektrischem Lichte kann deshalb, auch ohne jede Entbehrung, viel sparsamer umgegangen werden, als mit irgend einer anderen Art künstlichen Lichtes, weil es eben stets sofort zur Verfügung steht.

Als alleiniger Nachteil steht den vielen Vorzügen des elektrischen Glühlichtes nur sein verhältnismässig hoher Preis entgegen.

4. Das Gleichstrom-Bogenlicht.

Nachdem von Volta im Jahre 1800 die nach ihm benannte Säule erfunden worden war, haben bei Anstellung von Versuchen mit grösseren galvanischen Batterien in den Jahren 1801 und 1802 mehrere Forscher nahezu gleichzeitig die Thatsache bemerkt, dass eine stetige Lichtentwickelung, ein Lichtbogen, entsteht, wenn zwei

mit den Polen einer starken Batterie verbundene Kohlenelektroden nach kurz dauernder Berührung auf eine sehr kleine Strecke entfernt werden.

Als Humphry Davy im Jahre 1808 in den Besitz einer Batterie von 2000 Elementen gekommen war, erhielt er in Luft einen dauernden Lichtbogen von 10 *cm* Länge und im stark luftverdünnten Raum einen solchen von 18 *cm*. Davy hatte bei diesen Versuchen die Kohlenstäbe horizontal gestellt, durch den aufsteigenden Luftstrom wurde die zwischen den Kohlenstäben übergehende Flamme nach aufwärts gekrümmt (vergl. Fig. 15), daher rührt der jetzt noch allgemein übliche Name Lichtbogen.

Davy verwendete noch Holzkohlen, die sehr rasch abbrannten. Im Jahre 1843 empfahl Foucault für die Herstellung des Bogenlichtes den Gebrauch von Kohlenstäben, die aus den Graphitrückständen der Gasretorten geschnitten wurden.



Fig. 15. Form des Lichtbogens zwischen horizontalen Kohlenstäben.

Grove zeigte (1840), dass der Lichtbogen erheblich verlängert werden könne, ohne abzureissen, wenn man den Kohlenstäben Leichtmetalle oder deren Salze beimenge. Casselmann machte (1844) die Beobachtung, dass der Lichtbogen wesentlich ruhiger ausfalle, wenn man die Kohlen mit Salzlösungen tränke, und wies dabei schon damals besonders auf die beruhigende Wirkung der Borsäure hin.

Neuerdings werden für die Bogenlampen nur Stäbe verwendet, die aus einem innigen Gemenge von feinpulverisiertem Graphit mit Russ und Teer künstlich unter hohem Druck geformt und hierauf unter Luftabschluss bis zur Hellrotglut in Muffen erhitzt worden sind.

Solche massive Stäbe, deren Masse meist eine Spur Borsäure beigemengt ist, heissen Homogenkohlen.

Zumal als obere, positive Kohle werden in den Bogenlampen jedoch meist sogenannte Dochtkohlen verwendet. Es sind dies auf die oben angedeutete Weise hergestellte Kohlenröhren, deren Hohlraum mit einem weicheren Graphit ausgefüllt ist, dem Salze, besonders Kaliwasserglas, beigemengt werden. Der Lichtbogen wird durch die Anwendung der Dochtkohlen in der Mitte erhalten, centriert

(d. h. er läuft nicht um die Kohlenstäbe herum) und wesentlich beruhigt.

Erst durch die Erfindung und Einführung der Dochtkohlen durch Gebrüder Siemens in Charlottenburg (im Jahre 1880) hat das Bogenlicht jene Ruhe und Stetigkeit erlangt, die Voraussetzung für eine allgemeine praktische Anwendung der Bogenlampen als Lichtquelle sind.

Der Gleichstromlichtbogen ist, wie der Verfasser im Jahre 1868 durch Beobachtungen in einem rasch rotierenden Spiegel erkannte, nicht eine rasche Folge von Entladungsfunken, sondern eine stetige Lichterscheinung. Zwischen den hell leuchtenden Kohlenenden bildet sich eine schwach leuchtende, aus mehreren cylindrischen Zonen bestehende Lichtbrücke, die vermutlich von Kohlenteilchen gebildet wird, die von der positiven Kohle losgerissen werden und verdampfen, oder durch Dissociation aus Verbrennungsprodukten der Kohlen entstehen. Auch die absichtlich oder zufällig vorhandenen Beimengungen der Kohle sind für den Lichtbogen von grosser Bedeutung.

Diese Strombrücke verhält sich aber nicht wie ein gewöhnlicher Leiter, der dem Ohm'schen und Joule'schen Gesetz folgt; es treten vielmehr, vorzugsweise in unmittelbarer Nähe der positiven Kohle, Potentialsprünge auf, die auf eine im Lichtbogen thätige elektromotorische Gegenkraft oder einen sogenannten Übergangswiderstand an dieser Stelle hindeuten.

Wird der Lichtbogen im Vergleich zu der verfügbaren Spannung zu lang, so reisst der Bogen ab, und der Stromübergang zwischen den Kohlen hört auf. Zur Wiederherstellung des Bogens bedarf es einer kurzdauernden Berührung der Kohlen.

Zur Herstellung und Erhaltung eines deutlichen Gleichstrom-Lichtbogens ist daher immer ein erheblicher elektrischer Spannungsunterschied zwischen den Kohlenstäben, von etwa rund 40 Volt, nötig. Verwendet man wenigstens als positive Elektrode eine Dochtkohle, oder benutzt man zwei Dochtkohlen, deren Dochtmasse Salze leichtflüchtiger Metallsalze beigemengt sind, so ist die zur Erzielung eines Lichtbogens von gleicher Länge und Stromstärke nötige Spannungsdifferenz der beiden Kohlen um etwa 3 bis 6 Volt niedriger, als wenn man reine Homogenkohlen verwendet.

Allem Anschein nach findet der stärkere Potentialsprung beim Übergange von der positiven Kohle zum Lichtbogen statt, ein schwächerer aber auch an der Stelle, an welcher der Lichtbogen an der negativen Kohle anhaftet. H. Luggin fand z. B., vergl. umstehende Tabelle, folgende Zahlen:

Lichtbogenlänge in *mm*	Reine Kohlenstäbe bei 6,8 A. Potentialunterschied		Kohlenstäbe mit Soda getränkt bei 8,9 A. Potentialunterschied	
	+ Kohle Lichtbogen	Lichtbogen — Kohle	+ Kohle Lichtbogen	Lichtbogen — Kohle
2,9	25,9 Volt	13,9 Volt	0,4 Volt	17,5 Volt
3,0	27,1 »	15,4 »	1,8 »	17,6 »
3,9	26,9 »	16,4 »	0,7 »	19,3 »
4,0	32,2 »	16,5 »	3,8 »	17,6 »
5,0	31,0 »	18,3 »	2,9 »	19,7 »
6,8	33,3 »	18,4 »	7,0 »	21,0 »

Ähnliche Beobachtungen machten Lecher, Uppenborn, Fleming, Ayrton, Sylv. Thompson und Sahulka. Vermutlich wegen des verschiedenartigen Kohlenmaterials zeigen die Messungen jedoch manche Unterschiede. Alle fanden aber übereinstimmend, dass der grösste Teil des Spannungsabfalles zwischen der positiven Kohle und dem Lichtbogen stattfinde, dass der Abfall längs des Lichtbogens nahezu gleichförmig sei, und nur 2 bis 3 Volt betrage. Ebenso sei der Abfall an der negativen Kohle gering, möglicherweise sogar negativ.

Man kann aus den Untersuchungen der verschiedenen Beobachter schliessen, dass die zur Bildung eines Lichtbogens von vorgeschriebener Länge nötige Spannungsdifferenz mindestens aus zwei Teilen besteht, von dem der eine von der Bogenlänge unabhängig, der andere von dieser abhängig ist. Der erste Teil scheint von der Verdampfungstemperatur der positiven Kohle abzuhängen, da er mit zunehmendem Druck wächst, und die Verdampfungstemperatur mit dem Drucke steigt, und weil dieser erste Teil auch von der Natur des den Lichtbogen umgebenden Gases ziemlich unabhängig ist.

Den Zusammenhang zwischen Lichtbogenlänge und Spannung hatten O. Frölich und mit ihm viele Andere durch die Formel:

$$E = a + b \cdot l \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

darzustellen gesucht. Hier bedeutet E die Spannung in Volt bei der Länge l des Lichtbogens in mm; a und b sind Zahlwerte (a ungefähr 35 bis 40, im Mittel 38, b nahezu 2,4). Unzweifelhaft wächst a mit der Stromstärke, und wird mit zunehmender Kohlendicke kleiner, während b mit zunehmender Stromstärke abnimmt und von der Kohlendicke ziemlich unabhängig ist.

Für Homogenkohlen hat H. Ayrton für die Spannungsdifferenz E zwischen den Kohlen die Gleichung aufgestellt:

$$E = 38{,}9 + 2{,}07\, l + \frac{11{,}7 + 10{,}5 \cdot l}{i} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

worin i die Stromstärke in Ampère, l die Lichtbogenlänge in mm ist.

Diese Formel stellt nahezu alle in Betracht kommenden bekannten Beobachtungen mit reinen Kohlenstäben recht befriedigend dar, und

ist auf folgende, durch zahlreiche Versuche als ziemlich sichere Grundlagen anzusehenden Sätze aufgebaut:

1. Im Bogenlicht aufgewendete Arbeit und Bogenlänge hängen für verschiedene Stromstärken durch eine lineare Funktion zusammen. (Vergl. Fig. 16.)

2. Aufgewendete Arbeit und Stromstärke hängen für verschiedene Bogenlängen nach einer linearen Funktion zusammen. (Vergl. Fig. 17.)

3. Die geraden Linien, welche den Zusammenhang zwischen aufgewendeter Arbeit und Bogenlänge bei unveränderlicher Stromstärke darstellen, schneiden sich alle in einem Punkte, dessen Koordinaten negativ sind.

4. Die Geraden, welche den Zusammenhang zwischen aufgewendeter Ar-

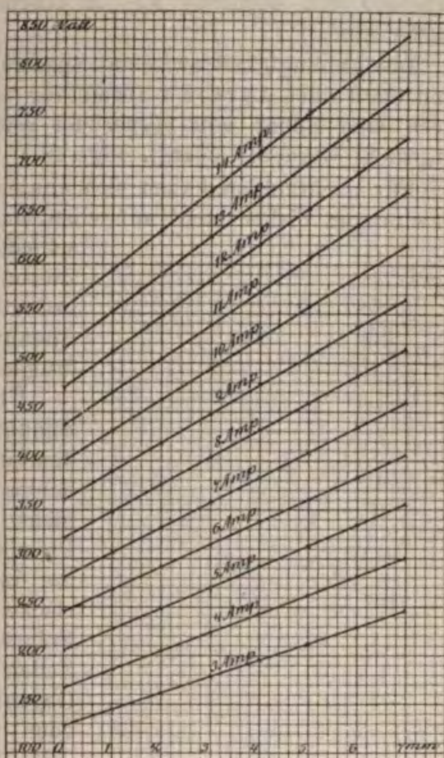


Fig. 16. Wattverbrauch des Gleichstrombogenlichtes für verschiedene Lichtbogenlängen bei verschiedenen Stromstärken.

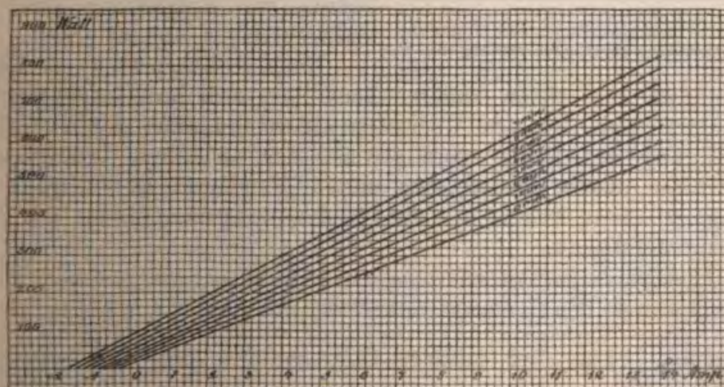


Fig. 17. Wattverbrauch des Gleichstrombogenlichtes bei verschiedenen Stromstärken für verschiedene Lichtbogenlängen.

beit und Stromstärke bei gleichbleibender Bogenlänge darstellen, schneiden sich ebenfalls alle in einem Punkte, dessen Koordinaten negativ sind.

Die Abhängigkeit zwischen Spannungsdifferenz und Stromstärke kann dann nach Ayrton's Formel für verschiedene Lichtbogenlängen, durch eine Schar von Hyperbeln mit rechtwinkligen Asymptoten dargestellt werden. (Vergl. Fig. 18.)

Für Dochtkohlen haben sich ähnlich einfache, übereinstimmende Beziehungen bisher nicht aufstellen lassen, weil schon geringe Verschiedenheiten in der chemischen Zusammensetzung der Dochtmasse bedeutende Schwankungen in der Spannung zwischen den Kohlen bedingen.

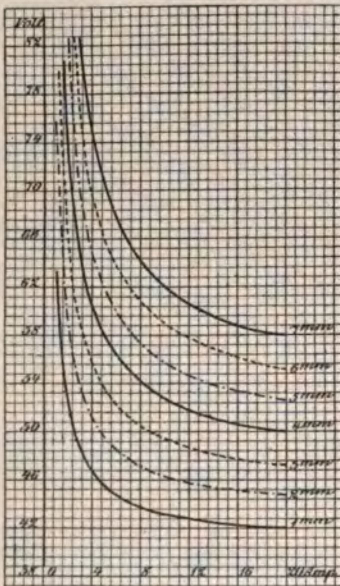


Fig. 18. Abhängigkeit zwischen Spannung u. Stromstärke bei Gleichstrombogenlicht.

Über die Ursache der erheblichen Spannungsdifferenz, die zwischen den beiden Kohlenspitzen des Bogenlichtes auftritt, ist man sich noch nicht völlig im Klaren. Manche Physiker, z. B. Edlund, vermuten im Lichtbogen eine elektromotorische Gegenkraft, also einen der Polarisation in den elektrolytischen Zellen ähnlichen Vorgang. Diese Gegenkraft könnte in chemischen oder thermoelektrischen Prozessen ihre Ursache haben. Auch das Losreissen und Abschleudern von elektrisch geladenen Kohlenmolekeln könnte zur Entstehung eines Potentialsprunges Anlass geben.

Nach Schwendler, v. Lang, Feussner und vielen anderen handelt es sich im Lichtbogen vielmehr um eine Art von Übergangswiderstand, der durch die Verflüchtigung der Kohle, vorzugsweise der positiven, bedingt wird; die Grösse dieses Gliedes, der ersten Konstanten in Glchg. 1 und Glchg. 2 hänge daher von der Verdampfungstemperatur des Elektrodenmaterials ab.

Ausserdem kommt allerdings noch der Spannungsverlust hinzu, bedingt durch den Leitungswiderstand des Lichtbogens, der proportional $k \cdot \frac{1}{q}$ ist. Der mittlere Querschnitt q des Lichtbogens ist

aber nicht konstant, sondern wächst mit der Stromstärke und dem Kohlenquerschnitt, aber nicht in genau proportionalem Verhältnis.

Da nach dem Ohmschen Gesetz (Kap. I, Abschn. 8, S. 7)

$$J = \frac{E}{W} \text{ und folglich:}$$

$$W = E \cdot J$$

ist, kann man auch von einem scheinbaren Widerstand W des Bogenlichtes reden, wenn man die als No. 1 und 2 gegebenen Formeln mit der jeweiligen Stromstärke multipliziert.

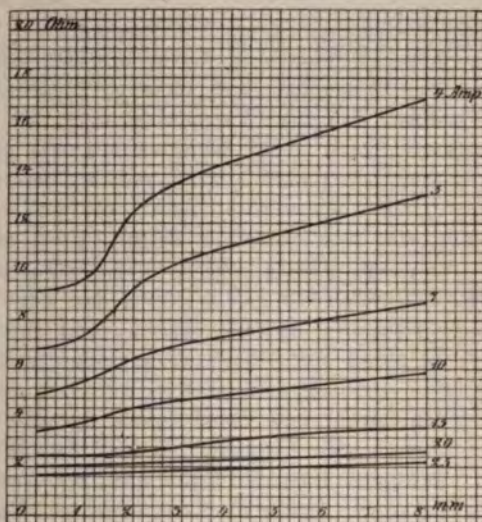


Fig. 19. Scheinbarer Widerstand des Gleichstrombogenlichtes in seiner Abhängigkeit von der Lichtbogenlänge.

Die in Fig. 19 wiedergegebenen Diagramme, in welchen für verschiedene Stromstärken die scheinbaren Widerstände des Bogenlichtes in Ohm als Funktion der Lichtbogenlänge dargestellt sind, zeigen, dass für längere Lichtbogen zwischen Widerstand und Lichtbogenlänge Proportionalität besteht, dass aber für kurze Lichtbogen, zwischen 0,5 und 2,5 *mm*, der Widerstand eine auffällige Erniedrigung erfährt.

5. Gestalt der Kohlen, Temperatur, Abbrand beim Bogenlicht.

Erst wenn ein Lichtbogen ziemlich lange Zeit (mehrere Minuten bis eine halbe Stunde) unter gleichbleibenden Bedingungen erhalten worden ist, stellt sich eine nahezu unveränderliche Gestalt der Kohlen und des Lichtbogens ein. Die positive Kohle, in der Fig. 20 die obere, zeigt in der Mitte eine muldenförmige Vertiefung, Krater genannt. Die untere Kohle spitzt sich stumpf kegelförmig zu. Die Kraterhöhle ist am stärksten weissglühend und sendet weitaus das meiste Licht aus. Der darüber gelegene, rund zugespitzte Teil (b in Fig. 20) ist glatt und leuchtet weniger stark, dann folgt nach oben eine dunkle, rauhe Fläche (c) und darüber (d)

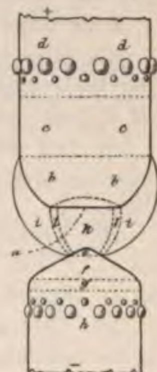


Fig. 20. Gestalt der Kohlen u. des Lichtbogens bei Gleichstrombogenlicht.

ein Kranz grösserer und kleinerer Kugeln. Diese Kugeln bestehen in der Hauptsache aus Kohlenstoff, vielleicht aber auch aus schwer flüchtigen Kohlenwasserstoffen, die dem zur Herstellung der Kohlenstäbe verwendeten Teer entstammen.

Von der negativen Kohle befindet sich nur die oberste Spitze e in hoher Weissglut und zwar verdankt sie diese hohe Temperatur vermutlich nur der Wärmestrahlung des benachbarten Kraters der positiven Kohle. Die darunter liegende glatte Fläche f leuchtet nur in gelblichem Lichte. Eine weitere, schon dunkle Zone g ist durch ganz kleine Kügelchen rauh. Hieran schliesst sich ein breiterer Kranz, der von grösseren Kugeln gebildet wird.

Der regelmässig entwickelte Lichtbogen besteht aus einer äusseren, grünlich gefärbten Hülle i (mit der Spektralfärbung der Borsalze), einem schmalen dunklen Raum l und einem violett gefärbten Kern k.

Je näher die Kohlen zusammen rücken, um so spitzer wird der Gipfel e der negativen Kohle, und um so tiefer der Krater.

Als Länge des Lichtbogens rechnet man immer den Abstand des Gipfels der negativen Kohle von der Ebene des Kraterrandes.

Bei ganz kurzen Lichtbogen entsteht endlich am oberen Ende der negativen Kohle eine Verdickung »Pilz« oder »Butzen« genannt. Meist ist dann ein eigentümliches, zischendes Geräusch zu hören.

Die positive Kohle schleudert Kohlenpartikelchen ab; wenn dieselben bei zu kurzem Lichtbogen in der sauerstoffarmen Atmosphäre nicht verbrennen können, sammeln sie sich auf der Spitze der negativen Kohle und geben zu der pilzartigen Wucherung Anlass.

Beim zischenden Bogenlicht ist der Spannungsunterschied um ungefähr 15 Volt niedriger. Bei 35 Ampère Stromstärke beträgt z. B. bei ruhigem Lichtbogen und 5 *mm* Bogenlänge die Spannung etwa 51 Volt; wenn jedoch der Lichtbogen zischt, sinkt die Spannung auf 36 Volt und die Stromstärke steigt gleichzeitig auf 42 Ampère. Das zischende Bogenlicht sendet auch viel weniger Licht aus, als das ruhige.

Die Tiefe des Kraters beim ruhigen Bogenlicht hängt aber nicht nur von der Bogenlänge, sondern auch von der Stromstärke ab, sie wächst wenig mit der Stromstärke.

Der Durchmesser D des Kraters in *mm* wächst mit der Stromstärke ungefähr nach der Formel

$$D = 3{,}2 + 0{,}17 \cdot i \qquad 3)$$

Vermutlich ist die Gesamtfläche des Kraters dem Energieverbrauche $E \cdot J$ des Bogenlichtes nahe proportional.

Die Temperatur ist im Krater am höchsten und vermutlich gleich der Verdampfungstemperatur des Kohlenstoffes. Bei höheren Stromstärken steigt daher nicht die Temperatur, sondern die Grösse

der Fläche, an der die Verdampfung stattfindet. Die von der Flächeneinheit des Kraters ausgesendete Lichtmenge bleibt daher auch bei verschiedenen Stromstärken dieselbe.

Nach Untersuchungen Violle's beträgt die Temperatur der Krateroberfläche etwa 3500° C., die der Spitze der negativen Kohle etwa 2700° C. Die Temperatur des Lichtbogens soll höher als die des Kraters sein, was nicht sehr wahrscheinlich erscheint, und soll mit der im Lichtbogen verbrauchten Energie wachsen.

Infolge der höheren Temperatur der positiven Kohle brennt diese unter Einwirkung des Sauerstoffes der umgebenden Luft rascher ab, als die negative Kohle. Ausserdem werden von dem im Lichtbogen übergehenden elektrischen Strome Kohleteilchen von der positiven Kohle losgerissen und abgeschleudert, zum Teil auch zur negativen Kohle übergeführt.

Die positive Kohle brennt ungefähr 2,24 Mal rascher ab, als die negative. Man wählt daher in der Praxis die positive Kohle von entsprechend grösserem Durchmesser, damit in gleicher Zeit nahezu gleiche Längen beider Kohlen verbrennen.

Bezeichnet man den stündlichen Verbrauch an beiden Kohlenstäben zusammen in Grammen mit V und die Stromstärke mit i, so kann für Kohlen von Gebrüder Siemens V annähernd durch die Formel:

$$V = 1{,}6 + 0{,}9 \cdot i \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

ausgedrückt werden. Je nach dem Kohlenmaterial bestehen jedoch wesentliche Unterschiede.

6. Die Lichtausstrahlung des Gleichstrombogenlichtes.

Die weitaus grösste Menge des glänzenden Lichtes einer Gleichstrombogenlampe, etwa 85 % der Gesamtmenge, werden vom Krater der positiven Kohle ausgestrahlt. Die negative Kohle giebt nur 10 % der Lichtbogen trägt nur 5 % bei.

Infolgedessen ist die Lichtausstrahlung unter verschiedenen Winkeln gegen die nach oben gerichtete Vertikale sehr verschieden.

Für eine Lampe von 10 Ampère, mit 2,5 *mm* langem Lichtbogen, ergab sich z. B.:

20°	30 NK	60°	120 NK	100°	420 NK	140°	800 NK
30°	70 »	70°	170 »	110°	650 »	150°	500 »
40°	85 »	80°	160 »	120°	850 »	160°	180 »
50°	105 »	90° (horizontal)	230 »	130°	1000 »	170°	50 »

Die Kurven der Fig. 21 und 22 stellen die Lichtverteilung für eine 13 Ampèrelampe und eine 4 Ampèrelampe graphisch dar. Die Lichtintensitäten sind dabei links als Längen auf Radien abgetragen; rechts sind, nach Rousseau, die Lichtintensitäten auf die Normalen

aufgetragen, die an den Enden der Projektionen der Radien errichtet sind.

Man sieht, dass ein grosser Teil des Lichtes von der negativen Kohle aufgefangen wird, und dass die negative Kohle selbst nur wenig Licht aussendet. Die grösste Lichtausstrahlung erfolgt etwa in einer Richtung, die 40^{0} unter der Horizontalen liegt. Je nach der Lichtbogenlänge ändert sich die Lichtverteilung jedoch wesentlich.

Bei mittleren Bogenlängen ist die Lichtausstrahlung in der Horizontalen etwa ein Viertel von der maximalen.

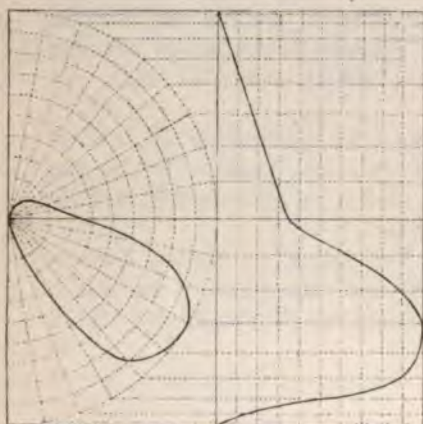


Fig. 21. Lichtverteilung einer 13 Ampère-Bogenlampe.

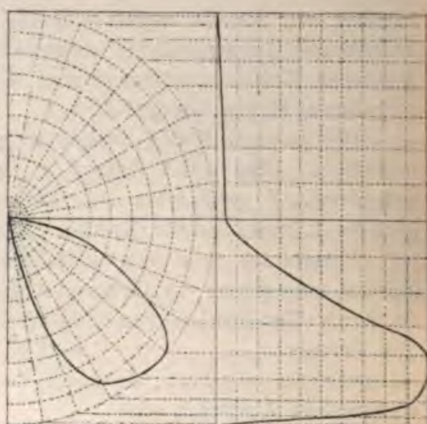


Fig. 22. Lichtverteilung einer 4 Ampère-Bogenlampe.

Des besseren Vergleiches wegen berechnet man die mittlere räumliche Lichtmenge d. h. die mittlere sphärische Intensität J_m, die eine Lichtquelle haben müsste, die nach allen Richtungen gleiche, in Summa aber dieselbe Lichtmenge aussendete, wie die Bogenlampe.

Dann ist: $$J_m = \frac{1}{4} \Sigma [\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2] (J_1 + J_2) \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

wenn J_1 die in der Richtung α_1, und J_2, die in der Richtung α_2 ausgestrahlte Lichtintensität bedeutet. Die Summe ist dabei über den halben Vertikalkreis auszudehnen.

Führt man für die oben mitgeteilten Zahlen diese Rechnung durch, so findet man 350 Kerzen.

Die Horizontalintensität einer Bogenlampe brauchte nur mit ungefähr $\frac{3}{2}$ multipliziert zu werden, um näherungsweise die mittlere sphärische Helligkeit zu finden.

Die mittlere hemisphärische Lichtstärke, bei der nur die Lichtausstrahlung unter der Horizontalen berücksichtigt wird, ist nahezu das Doppelte der mittleren sphärischen Intensität.

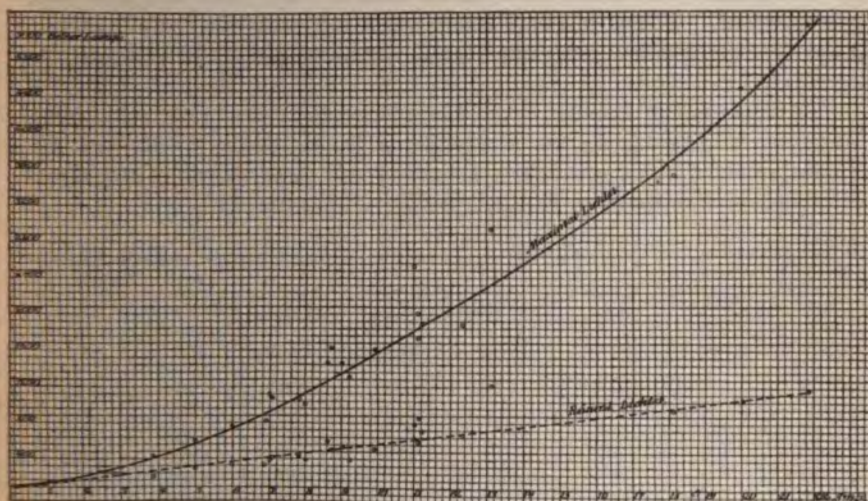


Fig. 23. Die Lichtstärke der Gleichstrom-Bogenlampe als Funktion der Stromstärke.

Von anderer Seite wird für die Berechnung der mittleren räumlichen Helligkeit J_m die Formel angegeben:

$$J_m = \frac{J_h}{2} + \frac{J_{max}}{4} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

wobei J_h die Intensität in horizontaler Richtung, J_{max} die Maximalintensität bedeutet.

Beispiel. Für die Lampen unter den Linden in Berlin ist z. B. $J_h = 196$, $J_{max} = 2014$. Hieraus findet man, $J_m = 1203$, während die genaue Formel 5) 1228 ergiebt.

Die Abhängigkeit der Lichtstärke von der Stromintensität wird durch Fig. 23 anschaulich dargestellt. Man erkennt, dass die mittlere räumliche Helligkeit sehr nahe der Stromstärke proportional ist, und für jedes Ampère um etwa 48, die mittlere hemisphärische Helligkeit somit um 95 Normalkerzen (Hefner-Einheiten) wächst.

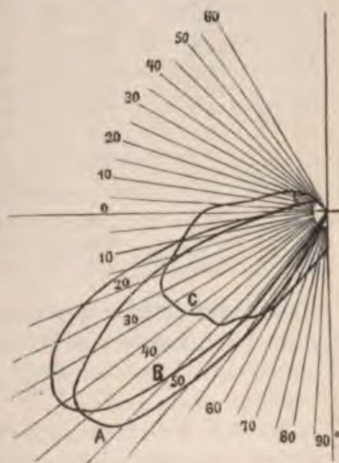


Fig. 24. Lichtverteilung der Gleichstrom-Bogenlampe.
A. Freibrennend.
B. Mit Klarglasglocke.
C. Mit matter Überfangglocke.

In Fig. 24 sind ausserdem noch die Lichtverteilungen einer frei brennenden Bogenlampe (Kurve A), die Lichtverteilung bei Gebrauch einer Glocke aus klarem Glas (Kurve B) und endlich bei Einhüllung der Bogenlampen durch eine matte Glocke aus Überfangglas veranschaulicht. Durch matte Glocken wird reichlich ein Drittel, durch helle Opalglasglocken nur ein Viertel der erzeugten Lichtmenge absorbiert.

Nachstehende Tabelle zeigt die gelegentlich der internationalen elektrischen Ausstellung im Frankfurt a. M. im Jahre 1893 von der Prüfungskommission erhaltenen Resultate und giebt über alle sonstigen in Betracht kommenden Fragen genügende Auskunft.

Kohlendurchmesser		Bogen-länge	Spannung	Strom-stärke	Elektr. Energie	Lichtintensität	
Docht-kohle *mm*	Homog.-Kohle *mm*	*mm*	Volt	Amp.	Voltamp.	Maximal-Intensität HL	räuml. Lichtst. HL
13,1	7,0	1,1	32	3,9	126	350	110
13,1	7,0	3,0	39	5,0	194	520	210
18,0	11,1	3,0	46	8,6	397	1380	510
18,0	11,1	3,6	49	11,1	546	1930	770
14,2	10,0	2,7	43	6,0	257	680	240
14,2	10,0	2,4	46	7,1	325	1000	320
16,3	11,2	2,0	37	8,0	298	920	290
16,3	11,2	1,4	40	9,2	370	1230	390
17,0	12,0	2,7	44	9,0	392	1380	445
17,0	12,0	3,7	49	9,9	490	1530	420
17,0	12,0	3,7	48	11,2	530	1810	610
18,1	14,5	4,1	49	11,1	542	1660	510
18,1	14,5	3,5	49	12,3	600	1800	560
24,3	16,1	5,5	48	18,1	863	3470	860
24,3	16,1	7,0	48,5	20,0	968	4420	970
24,3	16,1	7,5	49	21,8	1080	5110	1080
17,7	11,9	3,0	43	8,7	375	1540	420
17,7	11,9	5,6	50,5	11,0	554	2450	710
17,7	11,9	5,1	47	13,1	622	2860	1130
16,0	11,0	2,0	43	7,8	331	990	330
10,0	10,0	2,4	43	7,0	300	1040	300
14,0	10,0	2,3	43	6,9	296	730	240

Für die Maximalintensität giebt Palaz in Decimalkerzen[1]) (Bougies decimales) die Formel:

$$J_{max} = 200\,i + 4 \cdot i^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

Für den Wattverbrauch w für eine mittlere sphärische Decimalkerze gilt bei verschiedenen Stromstärken i die Formel:

$$w = \frac{1}{1{,}4 + 0{,}028\,i} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

[1]) 1 Decimalkerze = 1,13 Hefner-Einheiten.

Für verschiedene Stromstärken giebt Palaz folgende Tabelle:

Stromstärke in Ampère	Mittlere sphärische Lichtstärke in Decimalkerzen	Wattverbrauch für eine mittlere sphärische Decimalkerze
4	302	0,66
6	470	0,64
8	650	0,62
10	840	0,60
12	1042	0,58
14	1255	0,56
16	1477	0,54
20	1960	0,51
30	3360	0,45

7. Die Gleichstrombogenlampe mit eingeschlossenem Lichtbogen.

Alle vorstehenden Angaben beziehen sich auf den Fall, dass der Lichtbogen sich in der freien Atmosphäre entwickelt.

Diese Lampen bedürfen bei 10 Ampère Stromstärke und 2 *mm* Lichtbogenlänge etwa 41 bis 45 Volt Spannungsdifferenz. In Stromkreisen von etwa 110 Volt Betriebsspannung schaltet man daher gewöhnlich zwei solche Lampen, sowie einen Beruhigungswiderstand, der etwa 30 Volt verbraucht, hintereinander.

Bei so kurzem Lichtbogen fängt die negative Kohle etwa ein Drittel des vom Krater der positiven Kohle ausgesendeten Lichtes auf, und lässt diesen Teil nicht zu nützlicher Wirkung kommen.

Die Lampen bedürfen, wegen der starken Verbrennung der Kohlenstifte, mindestens aller 10 bis 12 Stunden Ersatz der Kohlen, auch die Feuersgefahr durch abfallende glühende Kohlen- und Ascheteilchen ist eine unerwünschte Beigabe dieser offen brennenden Bogenlichter.

Bei den Bogenlampen mit eingeschlossenem Lichtbogen sind der Lichtbogen und die ihm nächsten Teile der Kohlenstäbe mit einem Glase von 120 bis 160 *mm* Höhe und 40 bis 50 *mm* Durchmesser umgeben, und die Kohlen werden nahezu luftdicht in dieses Glasgefäss eingeschlossen.

Sobald man nun eine solche Lampe in Thätigkeit setzt, wird der im Glase befindliche Sauerstoff rasch verzehrt, der zurückbleibende Stickstoff ist nunmehr mit Kohlensäure, Kohlenoxydgas, Cyan und anderen Gasen gemischt, in welchen eine weitere Verbrennung der Kohle nicht stattfinden kann. Der Abbrand der Kohlen wird dadurch derart vermindert, dass ein Paar Kohlenstifte ungefähr 8 bis 15 mal längere Zeit vorhält, als in einer freibrennenden Bogenlampe von gleicher Helligkeit.

Dieses langsamere Verbrennen der Kohlenstäbe wird ausserdem dadurch begünstigt, dass man nach dem Vorgange von Jandus

(1893) in geschlossenen Bogenlampen mit einer vier- bis fünffachen Lichtbogenlänge von etwa 8 bis 10 *mm* arbeitet. Die erforderliche Spannung beträgt alsdann etwa 80 Volt. Neuerdings sind sogar Dauerbrandlampen mit noch höherer Spannung hergestellt worden, die in Stromkreisen von 220 Volt als Einzellampen verwendbar sind.

Bei langem Lichtbogen und höherer Spannung ist der Kohlenverbrauch geringer, als bei kurzem Bogen.

Der lange Lichtbogen bedingt aber ausserdem eine ganz andere Art des Abbrandes der Kohlen; während bei kürzeren Bogen die Kohlen ungefähr in der Weise abbrennen, wie dies Fig. 20, S. 53 darstellt, so brennen bei langen Bogen beide Kohlen stumpf ab, wie dies etwa Fig. 25 zeigt, und es kommt wenig oder keine Krateraushöhlung der positiven Kohle zu stande.

Die Lichtverteilung wird dadurch günstig beeinflusst; es wird nicht ein so grosser Teil des Lichtes, das die positive Kohle aussendet, von der negativen Kohle aufgefangen. Zumal unter Winkeln von 0—40⁰ unter der Horizontalen wird wesentlich mehr Licht von einer Lampe mit eingeschlossenem Bogen ausgestrahlt, als von einer gewöhnlichen Bogenlampe.



Fig. 25. Gestalt der Kohlen einer Gleichstrom-Bogenlampe mit eingeschlossenem Lichtbogen.

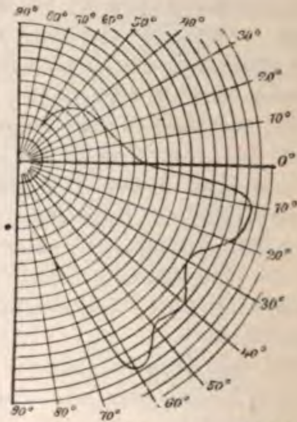


Fig. 26. Lichtverteilung einer Gleichstrom-Bogenlampe mit eingeschlossenem Lichtbogen.

Fig. 26 zeigt die Lichtverteilung bei einer solchen Dauerbrandlampe.

Es wird auch behauptet, die Kohlen erreichten bei einem geschlossenen Lichtbogen eine wesentlich höhere Temperatur, weil im Innern des geschlossenen Glases der Druck und deshalb die Verdampfungstemperatur des Kohlenstoffes höher sei. Wahrscheinlich ist diese Behauptung jedoch nicht richtig, weil bei jedem Nachschub der Kohlen durch die Lampe der Verschluss des Glasgefässes sich öffnen muss, und deshalb eine vollständige Abdichtung des Innenraumes und eine erhebliche Erhöhung des Druckes kaum stattfinden dürfte.

Da die langsam abbrennenden Kohlen nur selten des Nachschubes bedürfen, und die Lichtbogenverkürzung keine erhebliche Widerstandsänderung im Gefolge hat, kann der Lampenmechanismus sehr einfach sein.

Die Umsetzung der elektrischen Energie in Licht ist bei den Dauerbrandlampen jedoch etwas weniger günstig, als bei Lampen mit offenem Bogen. Während bei offenem Bogen und Stromstärken zwischen 6 und 10 Ampère durch 1 Watt etwa 2 Hefner-Einheiten mittlere räumliche Lichtstärke erzeugt wird, kommen bei der Dauerbrandlampe auf 1 Watt nur etwa 1,90 Hefner-Einheiten. Wenn das Glasgefäss durch verdampfte Kohle und Aschenteile trübe geworden ist, dürfte die Differenz sogar noch wesentlich grösser sein.

Der Hauptvorteil der Dauerbrandlampen ist der, dass sie weniger Bedienung durch Einsetzen neuer Kohlen bedürfen, dass sie die Nähe minder grell beleuchten, als mittlere Entfernungen, also zumal für Innenbeleuchtung und Aufhängung in geringer Höhe sehr geeignet sind, dass man sie mit nur geringem Vorschaltwiderstand als Einzellampen auch in Stromkreisen von 110, ja sogar 220 Volt brennen kann, und dass sie, obgleich der Lichtbogen oft an den Kohlen wandert, meist ziemlich ruhig brennen, weil nur ganz selten ein Nachschieben der Kohlen nötig ist, und dies die Stromstärke bei dem langen Lichtbogen mit hohem Widerstande verhältnismässig wenig beeinflusst.

8. Die Arten der Bogenlampen.

Um das Bogenlicht praktisch verwenden zu können, bedarf es einer besonderen Vorrichtung, Bogenlampe genannt, die bei Einschaltung des Stromes die Kohlen für einen kurzen Augenblick zur Berührung bringt, sie dann sofort trennt, und sie hierauf in einer kleinen, möglichst unveränderten, der Lichtbogenlänge entsprechenden Entfernung erhält und die Kohlen späterhin selbstthätig in dem Masse nachschiebt, als die Stäbe abbrennen.

Nach der Reihenfolge, in welcher sich diese verschiedenen Thätigkeiten vollziehen, und nach dem Stromlauf in der Lampe unterscheidet man: Hauptstromlampen, Nebenschlusslampen und Differentiallampen.

Da es über die mechanische Einrichtung der Bogenlampen[1]) eine grosse Zahl wertvoller Sonderwerke giebt, soll von der Beschreibung der konstruktiven Durchführung völlig abgesehen werden und hier nur der prinzipielle Unterschied der Lampenarten kurz erläutert werden:

---

[1]) Wir verweisen auf die Schriften: Biscan, Die Bogenlampe. — Weil, Neuere Bogenlampen. Leipzig, Verlag von Oskar Leiner.

a) Die Hauptstromlampe.

Bei diesen Lampen berühren sich die Kohlen, wenn kein Strom hindurch geht. Schaltet man die Lampe ein, so werden die Kohlen voneinander entfernt und späterhin, dem Abbrande der Kohlen entsprechend, nachgeschoben.

Fig. 27 soll die Einrichtung und Wirkungsweise dieser Lampenart erläutern.

Der von der positiven Klemme kommende Strom durchfliesst eine hohle Drahtspule H, und tritt von da aus in die positive Kohle; durch den Lichtbogen geht der Strom zur negativen Kohle über und tritt zur negativen Klemme aus. In dem Hohlraum der Spule H schwebt ein Eisenkern K, der die obere positive Kohle trägt. Der grösste Teil des Gewichtes des oberen Kohlenhalters und der positiven Kohle wird durch das Gegengewicht G getragen.

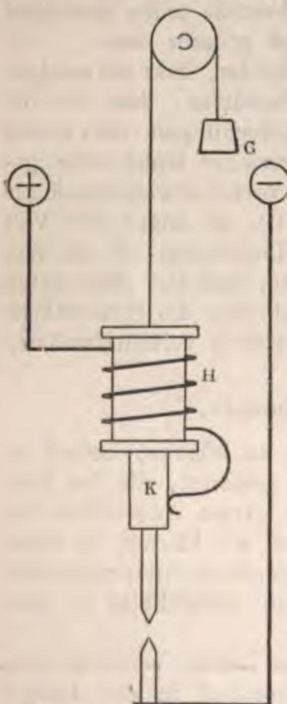


Fig. 27. Schematische Darstellung der Hauptstrom-Bogenlampe.

Im stromlosen Zustand ruht die positive Kohle infolge ihres Eigengewichtes auf der negativen auf; sobald aber der Strom eingeschaltet wird, zieht, infolge des entstehenden Magnetismus, die Spule H den Eisenkern K ein, die Kohlen werden getrennt, und der Lichtbogen entsteht.

Durch diesen Vorgang wird gleichzeitig der scheinbare Widerstand (vergl. Kap. III, Abschn. 4, S. 53) des Bogenlichtes eingeschaltet und dadurch nach dem Ohm'schen Gesetz der Strom geschwächt. Der scheinbare Widerstand wächst beim Abbrand der Kohle, der Strom nimmt ab; damit vermindert sich auch die magnetische Anziehung; das Gewicht des Kohlenhalters überwindet die magnetische Anziehung, welche die Spule H auf den Kern K ausübt, und der Kohlenhalter K sinkt so lange herab, bis der mit der Verkürzung des Lichtbogens wachsende Strom den Magnetismus soweit gesteigert hat, dass er dem Gewichte des Kohlenhalters wiederum das Gleichgewicht hält.

Durch die Wahl besonderer Formen des Eisenkernes K oder der Spule H kann man es dahin bringen, dass die Spule H auch in der veränderten Lage, bei gleicher Stromstärke stets die gleiche,

nach oben gerichtete Zugkraft auf den oberen Kohlenhalter K ausübt.

Die selbstthätige Regelung der Hauptstromlampe erfolgt somit annähernd auf konstante Stromstärke.

Da anfänglich beim Einschalten die Stromquelle durch die Bogenlampe kurz geschlossen wäre, würde im Augenblicke des Stromschlusses die Stromstärke eine gefährliche Höhe erreichen. Um dies zu vermeiden, muss man der Lampe stets einen angemessenen Widerstand vorschalten, der ein Anwachsen des Stromes über gewisse, vorübergehend zulässige Grenzen verhindert.

Haben z. B., was etwa praktischen Verhältnissen entspricht, bei einer 10 Ampèrelampe die Spule H 0,1 Ohm Widerstand und die Kohlen 0,3 Ohm Widerstand, und betrüge die Spannung 45 Volt, so würde im Augenblick des Stromschlusses die Stromstärke 45 : 0,4 = 112 Ampère erreichen. Durch diese gewaltige Stromstärke würde der Eisenstab so kräftig und so tief in die Spule eingezogen werden, dass der entstehende Lichtbogen sofort wieder abgerissen werden würde. Nach dieser Unterbrechung würden die Kohlen wieder zusammen fallen, und man würde im günstigsten Falle, nach mehrmaligem Aufflackern und Verlöschen, einen tanzenden Lichtbogen erhalten.

Schalten wir 2 Ohm Beruhigungswiderstand vor, so werden in diesem allerdings $w \cdot i = 2 \times 10 = 20$ Volt verbraucht, wir müssen somit, da die Lampe selbst 45 Volt braucht, die Betriebsspannung auf 65 Volt erhöhen. Bei Einschaltung der Lampe beträgt aber, nunmehr, wenn noch kein Lichtbogen gebildet ist, die Stromstärke nur noch 65 : 2,4 = 27 Ampère, die Stromschwankung und damit Stosswirkung ist also bei weitem nicht mehr so gross, wie vorher.

Um ein längeres unruhiges Auf- und Niederschwanken des Kohlenhalters, das auch jetzt noch stattfinden könnte, zu vermeiden, werden Bremsvorrichtungen verwendet; es sind dies meist mit Luft oder auch mit Flüssigkeit gefüllte Cylinder, in die ein mit dem Kohlenhalter verbundener, leicht beweglicher, nicht ganz dicht schliessender Kolben eintaucht.

In Hintereinanderschaltung sind Hauptstromlampen nicht wohl anwendbar, weil die durch Abbrand in einer Lampe veranlassten Schwankungen der Stromstärke sich auf alle Lampen übertragen würden.

b) Die Nebenschlusslampe.

Bei dieser Lampenart stehen, wenn kein Strom vorhanden ist, die Kohlen etwas voneinander entfernt. Sobald man die Lampe einschaltet, werden die Kohlen für einen Augenblick zur Berührung

gebracht, dann sofort um den Betrag des zu bildenden Lichtbogens voneinander entfernt, und später dem Abbrand entsprechend nachgeschoben.

Die Wickelung einer hohlen Drahtspule N, Fig. 28, in die der mit dem unteren Kohlenhalter verbundene Eisenkern K eintaucht, bildet einen Nebenschluss zum Lichtbogen. Die Last des unteren Kohlenhalters und des Eisenkernes K wird zum grössten Teil durch das Gegengewicht G ausgeglichen. Beim Einschalten ist zunächst kein Lichtbogen vorhanden, die ganze verfügbare Spannungsdifferenz macht sich an den Enden des Nebenschlusses geltend und sendet durch die Windungen der Spule einen verhältnismässig starken Strom, sodass der Eisenkern K kräftig in die Spule N eingezogen, der untere Kohlenhalter gehoben und die Kohlen zur Berührung gebracht werden.

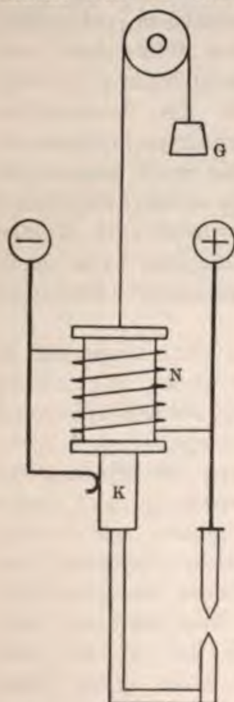


Fig. 28. Schematische Darstellung der Nebenschluss-Bogenlampe.

Sowie dies aber geschieht, geht der Strom fast widerstandslos von einer Kohlenspitze zur anderen über, die Spannung an den Enden der Nebenschlussspule sinkt sofort ausserordentlich; dadurch vermindert sich der Strom, der durch die Spule N fliesst; die magnetische Anziehung nimmt ab, der untere Kohlenhalter sinkt durch sein nicht völlig ausgeglichenes Gewicht, und der Lichtbogen wird gebildet.

Wenn durch Abbrand der Kohlen der Lichtbogen sich verlängert, nimmt die Spannung zwischen den Kohlen zu, dadurch wird der durch den Nebenschluss gehende Strom verstärkt, und hiermit die magnetische Anziehung vergrössert. Der Eisenkern K und mit ihm der untere Kohlenhalter wird gehoben, und der Lichtbogen wird wieder auf das normale Mass verringert.

Die Nebenschlusslampe ist somit derart eingerichtet, dass sie auf konstante Spannung regelt.

Die Nebenschlusslampe ist zur Hintereinanderschaltung zwar brauchbar, aber wenig geeignet.

c) Die Differentiallampe.

Während die Hauptstromlampe auf unveränderlichen Strom, die Nebenschlusslampe auf gleichbleibende Spannung regelt, wird

bei der Differentiallampe auf konstanten Widerstand, nämlich gleichbleibendes Verhältnis von Stromstärke und Spannung reguliert.

Erst mit dieser im Jahre 1879 durch v. Hefner-Alteneck erfundenen Lampenart ist es gelungen, mit gutem Erfolge Bogenlampen in Hintereinanderschaltung zu betreiben und damit eine weitgehende Teilung des elektrischen Bogenlichtes bei voller Unabhängigkeit der einzelnen Lampen voneinander in einer dem praktischen Bedürfnis völlig genügenden Weise durchzuführen.

Bei der Differentiallampe sind zwei Spulen H und N vorhanden; in beide taucht der Eisenkern K, mit dem der Halter einer der Kohlen fest verbunden ist, gleichzeitig ein. Wenn zwei Eisenkerne vorhanden sind, von welchen der eine in die eine, der andere in die andere Spule eintaucht und jeder einen der beiden Kohlenhalter beeinflusst, so ist das eine in prinzipieller Hinsicht nur untergeordnete konstruktive Abweichung.

Das wichtigste ist, dass die eine dickdrähtige Spule H in Fig. 29, vom Hauptstrom, der durch den Lichtbogen hindurchgeht, durchflossen wird, und die aus vielen dünnen Windungen bestehende Spule N einen Nebenschluss zum Lichtbogen bildet. Wird der Strom, weil der Lichtbogen zu klein ist, zu stark, so überwiegt die Anziehung der Hauptstromspule und vergrössert durch Einziehen und Heben des Eisenkernes K den Lichtbogen. — Wird aber infolge des Abbrandes der Kohlen der Lichtbogen zu lang, so wird der Widerstand des Lichtbogens zu gross, der Strom dadurch zu schwach, dafür steigt wegen des Anwachsens des Spannungsunterschiedes zwischen den Kohlen der abgezweigte, durch die Nebenschlussspule N fliessende Strom; der Eisenkern wird mehr in Spule N eingezogen und dadurch der Lichtbogen verkleinert.

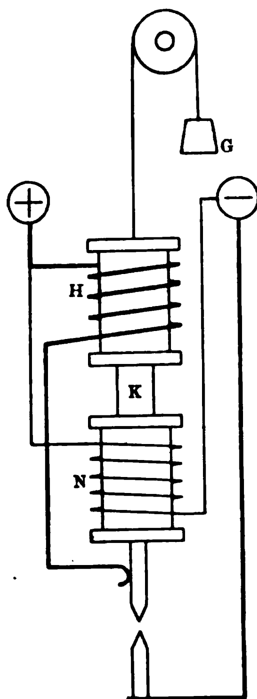


Fig. 29. Schematische Darstellung d. Differentiallampe.

Es kommt also jederzeit die Differenz der Zugkräfte der beiden Spulen H und N auf den Magnetkern zur Wirkung, und diesem Umstande verdankt diese Art von Bogenlampen ihren Namen.

Es kann die Differentiallampe, wie man sofort erkennt, auch als eine Verbindung der Regelungsweisen der Hauptstrom- und Nebenschlusslampe angesehen werden.

Da es zumeist wünschenswert ist, dass trotz des Abbrandes der Kohlen der Lichtbogen nahezu an derselben Stelle, der Mitte der umgebenden Glocke bleibt, so werden der obere und untere Kohlenhalter zumeist durch eine Kette, ein Band, oder ein Seil miteinander verbunden, die über eine feste Rolle gehen. (Vergl. z. B. Fig. 30.) An den Eisenkern, der in die Spule eingezogen wird, ist dann keiner der Kohlenhalter selbst befestigt, sondern der Kern veranlasst durch seine Bewegung eine Drehung der Rolle in dem einen

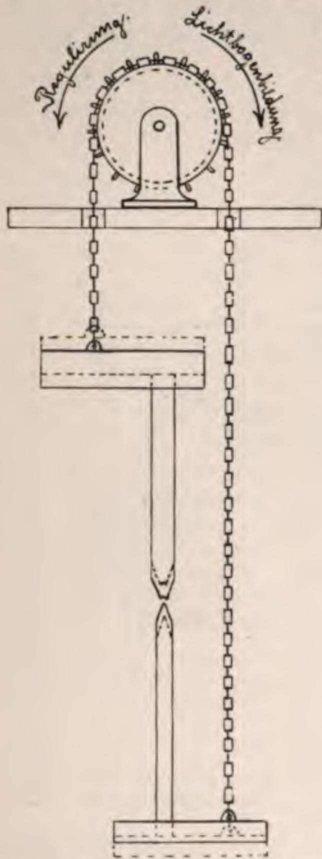


Fig. 30. Verbindung der beiden Kohlenhalter bei Lampen mit unveränderlichem Lichtpunkte.

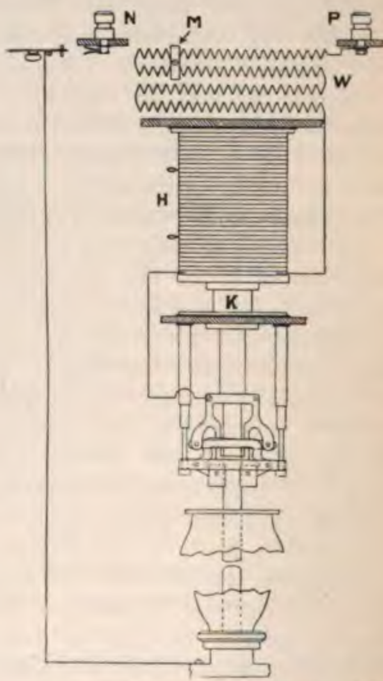


Fig. 31. Dauerbrandlampe der Union-Elektrizitäts-Gesellschaft.

oder dem entgegengesetzten Sinne. Bewegt sich die Rolle im Sinne des Uhrzeigers, so werden die Kohlen voneinander entfernt; bei entgegengesetzter Drehung werden die Kohlen genähert, wenn der Lichtbogen infolge des Abbrandes zu lang geworden ist.[1])

[1]) Es bedarf wohl kaum der besonderen Bemerkung, dass die Kette keine leitende Verbindung zwischen den beiden Kohlenhaltern herstellen darf.

d) Dauerbrandlampen.

Auch die Dauerbrandlampen mit eingeschlossenem Lichtbogen stimmen hinsichtlich ihrer Einrichtung in der Hauptsache mit den Lampen mit freiem Lichtbogen überein. Bei der in Fig. 31 beispielsweise abgebildeten derartigen Lampe der Berliner Union Elektrizitäts-Gesellschaft wird die Länge des Lichtbogens durch eine Hauptstromspule H bewirkt, die einen Eisenkern K einzieht.

Das Nachschieben der Kohlen wird durch zwei Hebelklemmbacken bewerkstelligt, die, wenn sie auf eine Grundplatte aufstossen, die Kohle loslassen und die Dichtungsvorrichtung öffnen. Wird der Eisenkern in die Spule eingezogen, so klemmen die Hebelbacken die Kohle fest und nehmen sie mit, ausserdem werden die Dichtungsringe geschlossen.

Durch Versetzen der Klemme M an dem oben in die Lampe eingebauten Vorschaltwiderstand W kann die Lampe für jede Betriebsspannung von 100 bis 120 Volt als Einzellampe brauchbar gemacht werden.

e) Kohlensparer.

Der Wunsch, die Kohlenstifte seltener auswechseln zu müssen, hat auch zu dem Versuche geführt, sogenannte Kohlensparer zur Anwendung zu bringen. Man umgiebt zu dem Zwecke das untere Ende der positiven Kohle A mit einem glockenartig ausgehöhlten Hute h aus unverbrennlichem, hitzebeständigem Material (Speckstein). In der Höhlung dieses Kohlensparers (vergl. Fig. 32) sammeln sich die infolge ihrer Erhitzung aufsteigenden Verbrennungsgase der Kohle. Es befinden sich somit die Enden der Kohlen, samt dem Lichtbogen, ähnlich wie bei der Dauerbrandlampe mit eingeschlossenem Lichtbogen, in einer Atmosphäre, die vorzugsweise aus Gasen besteht, in welchen die Kohlen nicht verbrennen können.

Fig. 32. Kohlensparer für Bogenlampen.

Der Apparat wird von der unteren Kohle B getragen; eine Stromüberleitung wird durch die Isolatoren JJ gehindert.

Zuerst wurden diese Kohlensparer von der Firma Hardmuth in Wien eingeführt, späterhin hat die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft in Berlin sich bemüht, derartige Einrichtungen in der Praxis zu verbreiten. Neuerdings haben Siemens & Halske A.-G., Berlin-Charlottenburg, diese Kohlensparer in Verbindung mit einem Reflektor bei ihrer Differential-Seillampe zur Anwendung gebracht.

Angeblich werden durch dieses Hilfsmittel bis 40% am Verbrauch an Kohlenstiften gespart. Durch die Änderung der Strom- und Spannungsverhältnisse, auch durch den Absatz von Ascheteilen auf den Kohlen, die sonst durch den Luftstrom zum grössten Teil weggeführt werden, scheint die gleichmässige Lichtausstrahlung der Bogenlampen bei Anwendung von Kohlensparern jedoch einigermassen beeinträchtigt zu werden. Die Meinungen der Praktiker über den technischen Wert dieser Einrichtung sind geteilt.

9. Die Schaltungen der Bogenlampen.

In kleinen Einzelanlagen mit kurzen Entfernungen der einzelnen Stromentnahmestellen von der Elektrizitätsquelle wird noch immer, zumal wenn man mit einer kleinen Anzahl von Akkumulatorenzellen auskommen will, eine Betriebsspannung von 65 Volt verwendet.

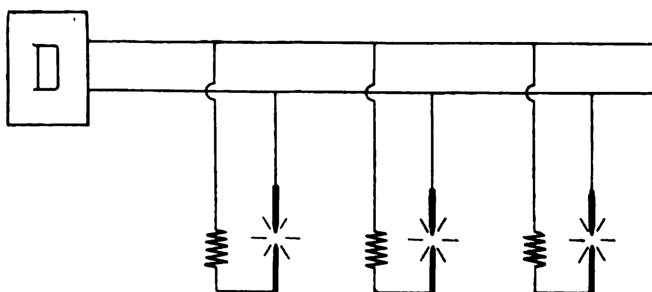


Fig. 33. Bogenlampen in reiner Parallelschaltung.

Dann werden die Bogenlampen einzeln in Parallelschaltung mit einem Vorschaltwiderstand verwendet (vergl. Fig. 33), in welchem die überschüssige Spannung von etwa 20 bis 25 Volt verbraucht wird. Ungefähr ein Drittel der verbrauchten elektrischen Energie wird alsdann nutzlos in Wärme verwandelt. Man verwendet bei dieser reinen Parallelschaltung, der grösseren Billigkeit wegen, meist Hauptstrom- oder Nebenschlusslampen. Man hat den Vorteil Bogenlampen der verschiedensten Stärke völlig unabhängig voneinander gebrauchen zu können. Für die Anwendung von Dauerbrandlampen ist diese Spannung zu niedrig.

Häufiger wird bei grösseren Einzelanlagen oder ganz kleinen Centralen eine Betriebsspannung von 110 bis 120 Volt angewendet. Dann werden meist zwei Lampen in Hintereinanderschaltung, unter Vorschaltung eines gemeinsamen Beruhigungswiderstandes benutzt (Zweierschaltung). (Vergl. Fig. 34.)

Von der im Stromkreise aufgewendeten elektrischen Energie werden dann ungefähr 27 bis 30 % im Vorschaltwiderstand nutzlos in Wärme umgesetzt, und nur der Rest kommt in den Lampen zur nützlichen Verwendung.

In Netzen mit 220 Volt Betriebsspannung werden entsprechend 4 oder auch 5 Lampen, sowie ein Beruhigungswiderstand hintereinander geschaltet. (Vergl. Fig. 35.)

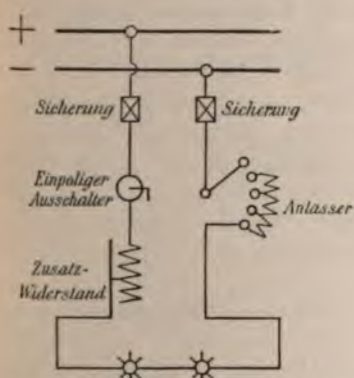


Fig. 34. Schaltung für Anschluss von 1 bis 2 Lampen an ein Netz von höchstens 120 Volt.

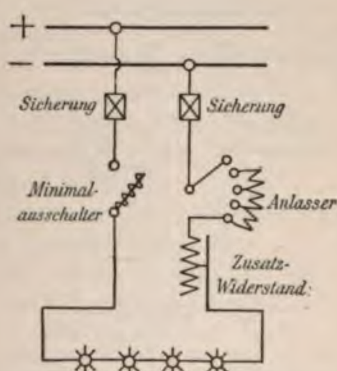


Fig. 35. Schaltung für Anschluss von 4 Lampen an ein Netz von höchstens 220 Volt.

Bei Anwendung mehrerer Lampen, die von demselben Strome durchflossen werden, gebraucht man am besten Differentiallampen, bei welchen der Lichtbogenwiderstand unverändert bleibt, weil in diesem Falle das Regulieren der einen der Lampen die übrigen am wenigsten beeinflusst.

Der Nachteil bei Anwendung der Reihenschaltung von Bogenlampen ist der, dass alle Lampen desselben Stromkreises mit gleicher Stromstärke, also gleicher Helligkeit brennen müssen, und dass die Lampen nur gemeinsam entzündet oder gelöscht werden können.

Schaltet man eine einzelne Lampe aus, so muss an deren Stelle ein dem scheinbaren Widerstand (vergl. S. 53) entsprechender Ersatzwiderstand eingeschaltet werden; man spart alsdann aber nur den Verbrauch an Kohlenstiften, nicht an elektrischer Energie.

Gerade für solche Fälle, in denen es wünschenswert erscheint, bei höherer Betriebsspannung eine Einzellampe oder nur zwei hintereinander geschaltete Lampen zu verwenden, werden die Dauerbrandlampen, die 70 bis 80 Volt Betriebsspannung erfordern, ein ausgedehntes Anwendungsgebiet finden. Neuerdings werden als Einzellampen für höhere Spannungen auch Lampen mit zwei hintereinander geschalteten Lichtbogen, also mit zwei Paar Kohlenstäben verwendet.

Um Ersparnisse an Leitungsmaterial herbeizuführen und grössere Bezirke an eine Centrale anschliessen zu können, geht neuerdings die allgemeine Tendenz dahin, höhere Betriebsspannungen zu verwenden.

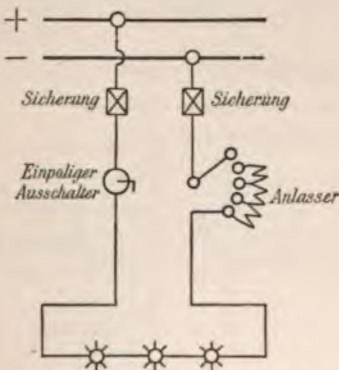


Fig. 36. Schaltung für 3 Lampen mit erniedrigter Lichtbogenspannung.

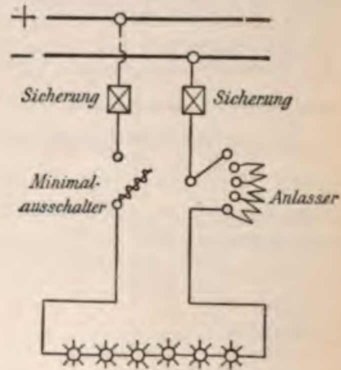


Fig. 37. Schaltung für 6 Lampen mit erniedrigter Lichtbogenspannung.

In den allerletzten Jahren hat man auch von praktischen Erfolgen gekrönte Versuche gemacht in Stromkreisen mit 110 bis 120 Volt drei Lampen mit erniedrigter Spannung[1]) mit nur einem ganz geringfügigen Vorschaltwiderstand oder 6 Lampen in Stromkreisen von 240 Volt in Hintereinanderschaltung zu brennen. (Vergl. Fig. 36 und 37.)

Die Ausnutzung der elektrischen Energie bei dieser sogenannten Dreierschaltung ist dann eine ganz vorzügliche, der Betrieb solcher Lampen mit kurzem Lichtbogen ist aber etwas empfindlich und giebt nur dann völlig befriedigende Resultate, wenn die Lampen für diesen Zweck besonders sorgfältig gebaut sind.

---

[1]) Die Spannung wird meist durch Verkürzung des Lichtbogens erniedrigt. Auch durch Benutzung besonders zugerichteter Kohlenstäbe kann man die Lichtbogenspannung verringern.

Ausserdem sind für die Einschaltung von Lampen in Dreierschaltung besondere Hilfsvorrichtungen nötig, wie man aus den Abbildungen 34 bis 37 erkennen kann.

10. Das Bremer'sche Bogenlicht.

Im Sommer des Jahres 1900 sind mehr oder minder unvollständige Nachrichten davon an die Öffentlichkeit gedrungen, dass Herr H. Bremer in Neheim a. d. Ruhr eine neue Art elektrischen Bogenlichts erfunden habe, bei der eine weit grössere Lichtausbeute erzielt werde, als bisher.

Er mengt den Kohlen 20 bis 50 % Calcium, Silicium, Magnesium enthaltende Verbindungen bei, und verwendet eine besondere Art einfacher Bogenlampen.

Nach Messungen von Wedding[1]) kann mit diesen Lampen thatsächlich eine bis beinahe dreifache Lichtausbeute erzielt werden, als dies bisher möglich war. Während bei den jetzigen Bogenlampen die Lichtausstrahlung des Bogens nur wenige Prozent (vergl. Kap. III, Abschn. 6, S. 55) der gesamten Lichtaussendung beträgt, ist bei dem neuen Lichte der viel ausgedehntere Bogen in wesentlich stärkerem Grade an der Lichtaussendung beteiligt.

In der Lampe stehen die Kohlen paarweise fast senkrecht gegenüber, sodass man drei Strombahnen unterscheiden kann; in der einen fliesst der Strom von oben nach unten, in der zweiten von unten nach oben, in der dritten horizontalen zwischen beiden Kohlen von der einen Kohle zur anderen in den Lichtbogen über. Der letztere Lichtbogen erfährt durch die beiden anderen Strombahnen eine Abstossung nach aussen und erhält eine fächerartige Ausbreitung. Bei Lampen mit schwächeren Stromstärken würde die Abstossung durch die beiden benachbarten Strombahnen zu schwach sein, und man verwendet daher zwei seitlich angebrachte Elektromagnete zur Ausbreitung des Lichtbogens, deren Spulen von dem Hauptstrom durchflossen werden.

Zum Zünden der Lampe und zur Regulierung der Lichtbogenlänge bei allmählichem Abbrand der Kohle wird ein im Nebenschluss zum Lichtbogen gelegener Elektromagnet verwendet. Der Nachschub der auf der einen Seite pendelnd aufgehängten Kohlen wird im übrigen fortwährend und nicht, wie bisher, stossweise, durch das Gewicht der Kohlen und ein Zusatzgewicht bewerkstelligt.

Die Lampe soll sehr gleichmässig brennen. Bei einer Messreihe, die Wedding anstellte, schwankte z. B. die auf 12,3 Ampère be-

---

[1]) Wedding, Das neue elektrische Licht, System Bremer, E T Z, Bd. XXI, Heft 27, S. 546.

stimmte Stromstärke nur um ± 0,3 A; die mittlere Spannung betrug 44,4 Volt und schwankte um ± 2,5 Volt.

Durch die Zusätze, die den Kohlen, vorzugsweise den positiven, beigemengt sind, wird der Widerstand des Bogens verkleinert, sodass trotz der wesentlich grösseren Länge des Lichtbogens die er. forderliche Lampenspannung nahezu die gleiche ist, wie bei anderen Bogenlampen von gleicher Stromstärke.

Um die Lichtentwickelung besser auszunutzen, die Wärme besser zusammen zu halten und den Abbrand der Kohlen zu vermindern, ist über die Enden der Kohlenstäbe eine konische, sich nach oben verjüngende Blechhaube gestülpt. An der Unterseite dieses Trichters schlagen sich die Verbrennungsprodukte der Kohlen als rein weisses Pulver nieder; dieser Niederschlag bildet einen vorzüglichen Reflektor, der das Licht nach unten wirft.

Die Bremerlampen haben nicht den stechenden Glanz, wie die bisherigen Bogenlampen, die Schattenbildung auf der oberen und unteren Hälfte einer matten Glocke fällt fast ganz weg, und eine matte Glocke, die eine solche Lampe umhüllt, erscheint als ziemlich gleichmässig leuchtende Scheibe.

Durch passende Wahl der den Kohlen beigemengten Stoffe kann dem Lichte eine angenehme, warme, mehr ins rötliche spielende Farbe gegeben werden. Solch rötliches Licht durchdringt aber bekanntlich Nebel und Wasserdampf viel besser, als das an blauen und violetten Strahlen so reiche Licht der gewöhnlichen Lampen.

Der Abbrand der Kohlen ist zunächst noch doppelt so gross, wie sonst; da die Kohlenstäbe der neuen Lampen aber nur etwa ein Drittel von dem Querschnitt der bei gewöhnlichen Lampen verwendeten Kohlen haben, dürfte der spezifische Materialverbrauch bei gleicher Stromstärke nicht grösser, sondern eher kleiner sein.

Nach Messungen von Wedding über die Lichtverteilung bei der Bremerlampe scheint die Lichtstärke zwischen 45° und 90° unter der Horizontalen nahezu konstant zu sein und dann bis zur Horizontalen auf etwa ein Sechstel abzunehmen. Bis 48° oberhalb der Horizontalen wird noch merklich Licht entwickelt.

Für Innenbeleuchtung und für Strassenbeleuchtung erscheint die Lampe daher wohl geeignet.

Für eine Gleichstrombogenlampe ohne Glocke, die bei 12,3 A im Mittel 44,4 Volt Spannung erforderte, also 546 Watt verbrauchte, betrug nach Wedding:

bei einem Winkel unter der Horizontalen . .	0°	6,7°	16,8°	26°	32°	36,8°	42°
die Lichtstärke in Hefnereinheiten . .	991	1470	3202	4060	5080	5220	6070

bei einem Winkel unter der Horizontalen . .	45,4	51,1°	55°	59,2°	65°	90°
die Lichtstärke in Hefnereinheiten . .	6520	6250	5410	7420	6070	6180.

Die hemisphärische Lichtstärke (vergl. Kap. III, Abschn. 6, S. 56) betrug 4320 HE; die Lampe hat somit einen Verbrauch von

$$\frac{546}{4320} = 0{,}126 \text{ Watt}$$

für eine Hefnereinheit.

Bei Anwendung einer Glocke betrug die hemisphärische Stärke derselben Lampe für die untere Halbkugel 2272 Hefnereinheiten, der Wattverbrauch für 1 HE etwa 0,2 Watt.

Berücksichtigt man, dass bei den gewöhnlichen Bogenlampen der Verbrauch für eine Hefnereinheit zwischen 0,3 und 0,5 Watt liegt, so scheint man Bremers Erfindung in der That als einen aussichtsvollen Fortschritt in der Bogenlichtbeleuchtung begrüssen zu können.

Leider sind bis jetzt genauere Einzelheiten über die Einrichtung der Lampen, Herstellung der Kohlen u. s. f. nicht veröffentlicht worden; auch der Erfinder hat auf Anfrage keine weiteren Auskünfte erteilt, sodass man sich zunächst mit diesen dürftigen Mitteilungen begnügen muss.

11. Die Nernstlampe.

Die verhältnismässig geringe Lichtausbeute der elektrischen Glühlampe hat viele Versuche veranlasst, Einrichtungen zu finden, die in gewissem Sinne die Vorteile des Bogenlichtes mit denjenigen des Glühlichtes verbinden, ohne die Nachteile, die beiden Methoden der Umwandlung elektrischer Energie in Licht anhaften, mit in Kauf nehmen zu müssen.

Als ein Ergebnis dieser Bemühungen sind einerseits die Bogenlampen für ganz geringe Stromstärken (1 bis 3 Ampère) anzusehen, die für bestimmte Zwecke Eingang in die Praxis gefunden haben und sowohl als Lampen mit freiem, als wie als Lampen mit eingeschlossenem Lichtbogen hergestellt werden.

Als bedeutsamste und aussichtsvollste Erfindung in dieser Richtung ist die Lampe des Prof. A. Nernst anzusehen, die auf der Thatsache beruht, dass die sogenannten Halbisolatoren, wie Kalk, Magnesia und chemisch verwandte feste Körper, die bei gewöhnlichen Temperaturen den Strom so gut wie gar nicht leiten, zu mässigen Leitern der Elektrizität werden und sich dann ähnlich wie Kohle und die minder gut leitenden Metalle verhalten, wenn sie auf hohe Temperaturen erhitzt werden.

Es werden z. B. bei der Nernstlampe aus Magnesia künstlich hergestellte, hartgebrannte Röhrchen verwendet, die durch besondere elektrische Heizeinrichtungen zunächst erhitzt werden. Die Zuführung des Stromes erfolgt durch dicht an den Leuchtkörper anschliessende Metallhülsen. Sowie das Röhrchen erwärmt wird, leitet es den Strom, in der Heizvorrichtung nimmt der Strom alsdann gleichzeitig ab; schliesslich schaltet sich der den Heizapparat durchfliessende Strom selbstthätig aus. Verwendet man keine selbstthätige Erwärmungsvorrichtung, so muss man das Röhrchen mit einer Flamme vorwärmen. Ist das Röhrchen einmal in Glut, so wird es durch den hindurchgehenden Strom auf so hoher Temperatur erhalten, dass es ein angenehmes Licht aussendet. Die Nernstlampen sollen am besten mit Wechselstrom betrieben werden, jedoch soll auch Gleichstrom verwendet werden können.

Solche Röhrchen sollen, wenn man die Querschnitte und Längen passend wählt, mit jeder Spannung bis 400 Volt brennen können, und eine verhältnismässig hohe Lebensdauer haben. (200 Stunden?) Für jede Hefnereinheit Lichtstärke werden 1,5 bis 1,6 Watt verbraucht, während die Bogenlampe samt Vorschaltwiderstand für die gleiche Lichterzeugung nur 0,5 bis 1 Watt braucht, wohingegen die Glühlampe 2,5 bis 3,8 Watt an elektrischer Energie für jede Normalkerze beansprucht.

Wenn es künftig einmal gelingen sollte, die erheblichen Schwierigkeiten mit Erfolg zu überwinden, die vorzugsweise in der Notwendigkeit liegen, den Glühkörper vor seiner Benutzung anzuwärmen, so würde die Nernstlampe ein wertvolles Zwischenglied zwischen dem Bogenlicht und dem Glühlicht bilden.

Hinsichtlich der Feuersicherheit steht unbedingt, von keiner anderen Lichtquelle erreicht, an erster Stelle die Glühlampe; ihr steht ziemlich nahe die Bogenlampe mit eingeschlossenem Lichtbogen und die Nernstlampe, deren Glühkörper auch in einen Glaskörper völlig eingeschlossen werden kann, während an letzter Stelle die gewöhnliche Bogenlampe folgt, die aber noch immer viel weniger feuergefährlich ist, als Gaslampen und Lampen mit flüssigen Ölen.

12. Die Kosten des elektrischen Lichtes.

Angaben von allgemeiner Giltigkeit über die Kosten des elektrischen Lichtes lassen sich nicht machen, da je nach den örtlichen Verhältnissen, der Art des Betriebes, Umfang der gesamten Anlage u. s. f. sich der Preis der Erzeugung einer Kilowattstunde sehr verschieden stellt. Unter Einrechnung der Rabatte u. s. w. dürfte sich ein Betrag von 55 Pfennigen für 1 Kilowattstunde etwa als Durchschnittspreis für die von elektrischen Centralen bezogene elek-

trische Energie ergeben. — Rechnet man, wie bereits früher erwähnt, 50 Watt für eine 16 kerzige Normallampe, so würde sich der zwanzigste Teil, also 2,75 Pfennige, für eine Lampenbrennstunde ergeben, wenn man die Verzinsung und Amortisation der Einrichtung ausser Betracht lässt.

Nach den sehr sorgsamen Ermittelungen von Heim[1]) kommen in einer Reihe von Fällen, unter Berücksichtigung aller Ausgaben für Verzinsung, Amortisation, Löhne u. s. w. folgende Werte in Betracht.

Zusammenstellung der Anlage- und Betriebskosten für verschiedenartige Glühlichtanlagen, bezogen auf eine 16kerzige Glühlampe.[2])

Bezeichnung der Anlage. Maximaler Stromverbrauch in Watt.	Anlagekosten von 1 installierten Glühlampe inkl. Einrichtung zur Stromerzeugung Mk.	Anlagekosten von 1 installierten Glühlampe ohne Einrichtung zur Stromerzeugung Mk.	Jede installierte Lampe brennt jährlich im Mittel Stunden	Kosten von 1 Brennstunde einer 16kerzigen Glühlampe Pfg.
Restauration. 4570 Watt. Gasmotor. Reiner Maschinenbetr. Elegante Ausstattung.	85	28,7	{ 2370 { 1185	1,51 2,60
Vergnügungslokal 15000 Watt. Stat. Lokomobile. Reiner Maschinenbetrieb. Mittelfeine Ausstattung.	73	21.5	1180	1,67
Druckerei. 12400 Watt. Gasmotor. Akkumulatoren als Reserve. Einfache Ausst.	79	15,8	1800	1,94
Druckerei. 12400 Watt. Kraftgasanlage mit Gasdynamo. Sonst wie 3.	116.0	17,2	1800	1.56
Fabrik. 22000 Watt. Dampfmaschine. Kein besonderer Kessel. Reiner Maschinenbetr. Einfachste Ausstattung.	42,5	14,3	{ 565 { 1130	1,41 0.96

[1]) Die Einrichtung elektrischer Beleuchtungsanlagen, Leipzig 1898, O. Leiner, 3. Auflage, S. 608.

[2]) Bogenlampen sind nach Massgabe der Stromstärke in Glühlampen umgerechnet. Gaspreis 15 Pfg. für 1 *cbm*. Bei Strombezug aus einer Centrale 60 Pfg. für 1 Kilowattstunde.

Bezeichnung der Anlage. Maximaler Stromverbrauch in Watt.	Anlagekosten von 1 installierten Glühlampe inkl. Einrichtung zur Stromerzeugung Mk.	ohne Einrichtung zur Stromerzeugung Mk.	Jede installierte Lampe brennt jährlich im Mittel Stunden	Kosten von 1 Brennstunde einer 16kerzigen Glühlampe Pfg.
Ladengeschäft. ca. 1350 Watt. An Centralstation angeschloss. Mittelfeine Ausstattung.	—	33,0	563 1320	4,11 3,67
Restauration wie 1). 4570 Watt. An Centralstation angeschloss. Elegante Ausstattung.	—	29,7	2370 1185	3,18 3,34

Um einen Vergleich mit den Kosten anderer Beleuchtungsarten zu erhalten, hat Wedding[1]) völlig unparteiische Berechnungen angestellt. Er hat dabei berücksichtigt, dass das Licht einer Glühlampe allmählich von 16 auf 12 Kerzen, die von Gasglühlicht ausgesendete Lichtstärke allmählich in 300 Stunden von 64 auf 47 Kerzen zurückgeht, und daher nur die Mittelwerte eingesetzt.

Wedding's Angaben beziehen sich auf die in der Praxis gebräuchlichsten Formen der verschiedenen Lichtquellen. [2])

Dabei haben sich folgende Werte ergeben:

	Lichtstärke in der Praxis Kerzen	Mittlere hemisphär. Lichtstärke bei 300stündiger Brennzeit: unarmiert Kerzen	armiert mit Milchglasschirm Kerzen	Opalkugel Kerzen	Kugel Kerzen
Leuchtgas (Schnittbrenner, Syst. Bray)	30	20	—	—	—
Leuchtgas (Rundbrenner, Argand)	20	13	18	18	12
Leuchtgas (Regenerativbrenner, Wustmann)	111	—	111	—	—
Leuchtgas (Gasglühlicht)	50	29	40	39	26
Spiritusglühlicht	30	15	21	20	13
Petroleum (14liniger Normalbrenner)	30	20	28	27	18
Petroleum - Glühlicht (Syst. Spiehl)	40	20	28	26	18
Acetylen	60	40	56	—	—
Elektrisches Glühlicht	16	14	20	19	13
Elektrisches Bogenlicht (10 Ampère)	600	600	—	400	—

[1]) Wedding, Über die Kosten der gebräuchlichsten Lichtquellen. Sonderabdruck aus den Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleisses

[2]) Dabei ist gerechnet: 1 *cbm* Leuchtgas 16 Pfg., 1 *l* Spiritus 35 Pfg., 1 *l* Petroleum 20 Pfg., 1 *l* Acetylengas 0,15 Pfg. (wenn 1 *kg* Calciumkarbid 300 *l* Acetylen liefert und 45 Pfg. kostet). 1 Kilowattstunde elektrische Energie 55 Pfg

	Stündlicher Verbrauch	Aufgewendete Wärmemenge Kalorien	Verbrauchte Wärmemenge f. 1 Kerze Kalorien	Preis einer Brennstunde Pfg.	Preis einer Kerzenstunde Pfg.
Leuchtgas (Schnittbrenner, Syst. Bray)	399 *l* Leuchtgas	1995	66,5	6,4	0,32
Leuchtgas (Rundbrenner, Argand)	200 *l* »	1000	50	3,2	0,25
Leuchtgas (Regenerativbrenner, Wustmann) . .	408 *l*	2042	18,4	6,5	0,06
Leuchtgas (Gasglühlicht) .	100 *l*	500	10	1,6	0,05
Spiritusglühlicht	0,057 *l* Spiritus	318	10,6	2,0	0,07
Petroleum (14liniger Normalbrenner)	0,1077 *l* Petroleum	960	32	2,2	0,11
Petroleum - Glühlicht (Syst. Spiehl)	0,05 *l* Petroleum	550	13,75	1,0	0,05
Acetylen	36 *l* Acetylen	534	8,9	5,4	0,13
Elektrisches Glühlicht . .	48 Watt	41,4	2,59	2,7	0,19
Elektrisches Bogenlicht (10 Ampère)	258 »	222	0,37	14,3	0,04

Am billigsten ist, absolut genommen, hiernach das Petroleumglühlicht, ihm folgen Gasglühlicht, Spiritusglühlicht, gewöhnliches Petroleumglühlicht, elektrisches Glühlicht, Gasrundbrenner und weitaus am teuersten erscheint das elektrische Bogenlicht.

Reduziert man jedoch auf die Kosten von 1 Normalkerze, so ist das Bogenlicht am billigsten, ihm kommt jedoch das Glühlicht mit Petroleum, Gas und Spiritus ziemlich nahe. Elektrisches Glühlicht, obgleich hoch im Preise, stellt sich immer noch billiger, als die alten Formen der Gasbeleuchtung.

Selbstverständlich dürfen solche Zahlen nur sehr vorsichtig verglichen werden, da für die Praxis wesentliche Vorteile und Nachteile (z. B. die hohe Zerbrechlichkeit der Glühstrümpfe, Bequemlichkeit des Ingangsetzens der Beleuchtung, Feuersicherheit u. s. w.) rechnerisch sich nicht in Betracht ziehen lassen.





IV. Kapitel.

Die chemischen Wirkungen des Stromes.

1. Chemische Zersetzungen durch den Strom. Bezeichnungen.

Wenn man in den äusseren Schliessungskreis eines Stromerzeugers eine Flüssigkeit einschaltet, etwa dadurch, dass man den Leitungsdraht zerschneidet und die beiden Enden des Drahtes frei in eine Flüssigkeit eintauchen lässt, so giebt es drei Möglichkeiten:

a) Eine Anzahl flüssiger Körper, z. B. Petroleum, geschmolzenes Paraffin und die meisten Öle lassen den Strom überhaupt nicht hindurch gehen.

b) Quecksilber und andere geschmolzene Metalle, auch die meisten flüssigen Metalllegierungen, z. B. die Amalgame, leiten den Strom, ohne irgendwelche Spur einer Zersetzung zu zeigen. Es findet keinerlei Bewegung wägbarer Bestandteile der Flüssigkeit statt.

c) Angesäuertes oder salzhaltiges Wasser hingegen, gelöste oder geschmolzene Säuren, Salze oder Alkalien werden, wenn der Strom durch sie hindurch geht, in ihre Bestandteile zerlegt. Diesen auf elektrischem Wege herbeigeführten Zersetzungsprozess nennt man Elektrolyse. Die Leitung der Elektrizität erfolgt durch eine fortschreitende Bewegung wägbarer Bestandteile der Flüssigkeit.

Mit den unter c) angeführten Vorgängen beschäftigt sich dieses Kapitel. Die stets gleichzeitig auftretenden Wärmeprozesse nach dem Joule'schen und Peltier'schen Gesetz lassen wir dabei unberücksichtigt.

Faraday hat eine Anzahl Bezeichnungen eingeführt, die in der Wissenschaft und Technik internationale Giltigkeit erlangt haben. Wir stellen dieselben zunächst zusammen.

Elektrolyse. Wenn ein Strom durch eine Flüssigkeit hindurchgeht, die aus einer chemischen Verbindung in Lösung oder in geschmolzenem Zustande besteht, so erfahren diese Verbindungen eine chemische Zersetzung, und dieser Vorgang heisst Elektrolyse.

Ein Apparat, der zur Ausführung einer Elektrolyse dient, heisst eine Zersetzungszelle. Ist der Apparat dazu bestimmt, die Mengen der ausgeschiedenen Zersetzungsprodukte zu messen, so nennt man die Vorrichtung ein Voltameter.

Elektrolyt. Ein Stoff, welcher fähig ist, durch einen hindurchgeführten Strom in seine Bestandteile chemisch zerlegt zu werden, heisst ein Elektrolyt.

Elektroden. Die in die Flüssigkeit eintauchenden beiden Enden des Leiterkreises, durch welche der Strom in den Elektrolyt ein-, beziehentlich wieder austritt, führen den gemeinsamen Namen Elektroden. Meist werden als Elektroden Metallplatten (Platinplatten) oder Kohlenplatten verwendet.

Anode. Die Elektrode, durch welche der positive Strom in die Flüssigkeit eintritt, heisst Anode.[1])

Kathode. Die Elektrode, durch welche der positive Strom aus der Flüssigkeit wieder austritt, heisst Kathode.[2])

Ionen. Die Bestandteile, in welche der einer Zersetzung unterworfene Körper durch die Elektrolyse zerfällt, nennt man die Ionen. Der Bestandteil, der sich an der positiven Elektrode, also an der Anode, ausscheidet, führt den Namen Anion[3]); das an der negativen Elektrode, an der Kathode, auftretende Ion heisst Kation.[4])

2. Theoretische Anschauungen über die Elektrizitätsleitung bei der Elektrolyse.

Die Leitung der Elektrizität in einem Elektrolyt erfolgt durch die Bewegung wägbarer Teilchen, der Ionen, an welchen freie Elektrizitätsmengen haften. Diese Elektrizitätsmengen werden der einen Elektrode entnommen und an die andere abgegeben.

An chemisch äquivalenten Stoffmengen sitzen gleichgrosse Elektrizitätsmengen.

Man nimmt auf Grund der Hittorf'schen Arbeiten über die Wanderung der Ionen und F. Kohlrausch's Messungen der Leitfähigkeiten der Lösungen nach Arrhenius an, dass in elektrolysierbaren Flüssigkeiten ein Teil der Molekeln des Elektrolytes bereits zerfallen ist, und dass diese Atome oder Atomgruppen in freiem, unverbundenem und beweglichem Zustande in der Flüssigkeit verteilt vorhanden sind. Man spricht, wegen der entfernten Ähnlichkeit dieses Vorganges mit den Dissociationserscheinungen bei Erwärmung der Verbindungen, von einer Lösungsdissociation und nimmt an, dass bei Lösungen eine um so grössere Anzahl von Molekeln bereits dissociiert sei, je grösser der Verdünnungsgrad ist.

---

[1]) Vom griechischen Worte ἀνά, aufwärts, und ὁδός, Weg.
[2]) Vom griechischen Worte κατά, abwärts, und ὁδός, Weg.
[3]) Ἀνιόν, das, was aufwärts geht.
[4]) Κατιόν, das, was abwärts geht.

Diese bereits zerfallenen, als Ionen in der Lösung bereits vorhandenen Molekeln oder Molekulargruppen sind es allein, durch die eine Leitung der Elektrizität bewerkstelligt wird, d. h. Elektrizitätsmengen von der einen Elektrode zur anderen übertragen werden. Das Lösungsmittel und die ungespaltenen Molekeln nehmen an der Elektrizitätsleitung nicht teil.

Die in der Flüssigkeit enthaltenen gespaltenen Molekeln unterscheiden sich dadurch von den Molekeln der gleichartigen freien Molekeln oder Molekulargruppen, dass sie freie elektrische Ladungen besitzen. Beim Austritt geben sie diese elektrischen Ladungen an die Elektrode ab und gehen in den Zustand freier, unelektrischer Molekeln über. Die in einer Sekunde von den positiven Ionen an die Kathode abgegebene Elektrizitätsmenge ist die Stromstärke.

Nach Arrhenius zersetzt somit eigentlich der elektrische Strom die Verbindungen nicht, sondern er richtet nur die Wege der bereits vorhandenen gespaltenen, elektrisch geladenen Ionen nach den mit freien elektrischen Ladungen behafteten Elektroden. In dem Masse als gespaltene Molekeln an den Elektroden ausgeschieden werden, zerfallen in der Flüssigkeit vorher ungespaltene Molekeln in ihre Bestandteile.

Diese Arrhenius'sche Theorie erklärt ungezwungen, warum die geringste Potentialdifferenz der Elektroden einen Strom in einer elektrolysierbaren Flüssigkeit hervorbringen kann, was auf Grund der älteren Anschauungen unerklärlich sein würde.

Die Vorstellung, dass Molekeln, die sonst so starke chemische Anziehungskraft zu einander haben, wie z. B. Cl und Na, in der Flüssigkeit gespalten nebeneinander vorhanden sein sollen, hat zunächst etwas fremdartiges. Man schreibt diese in den Lösungen auftretende Spaltung der Molekeln der Verbindung und die gleichzeitige elektrische Ladung der getrennten Bestandteile, diesen Prozess der Ionisation, einer Anziehung zu, die das Lösungsmittel auf die Ionen ausübt, vergleichbar den gewaltigen Anziehungskräften, die sich bei den Erscheinungen der Oberflächenspannung und ähnlichen Molekularvorgängen geltend machen.

Das Ion Na unterscheidet sich infolge seiner positiv elektrischen Ladung wesentlich von dem freien Elemente Natrium in seinen Eigenschaften.

Die gelegentlich der Auflösung von Chlornatrium in Wasser auftretende Ionisation entspricht bei exothermischen Verbindungen, d. h. bei Verbindungen, die sich unter Wärmeentwickelung aus ihren Bestandteilen bilden, einer Abkühlung, die beim Lösungsprozess stattfindet.

Ionen können sowohl Elemente als Komplexe verschiedener Atome sein. Bei Na Cl sind z. B. die Ionen Na und Cl; bei KHO

aber K und HO; bei $CuSO_4$ sind Cu und SO_4 die Ionen. Als Ionen können Atomkomplexe existieren, die sonst nicht frei vorkommen.

Die Ionen bewegen sich durch den Elektrolyt hindurch, bis sie an den Elektroden erscheinen und dort merklich werden; diese Bewegung wird die Wanderung der Ionen genannt. Dabei bewegen sich die Ionen mit verschiedener, aber bestimmter Ionengeschwindigkeit, die von der Natur des Ions und von der Konzentration des Elektrolyts abhängig ist. Erst bei starker Verdünnung sind die Ionengeschwindigkeiten von der Konzentration unabhängig.

3. Faraday's Gesetz.

Für die elektrolytischen Vorgänge gilt das von Faraday im Jahre 1833 aufgestellte Gesetz der festen elektrolytischen Wirkung. Dasselbe lautet: Die durch einen Strom zersetzten Mengen sind einander chemisch äquivalent und der Stromstärke und der Zeit, während welcher der Strom gewirkt hat, proportional.

An den Elektroden werden somit chemisch äquivalente Mengen der Ionen ausgeschieden, und wenn ein und derselbe Strom durch mehrere Zersetzungszellen hintereinander hindurchgeführt wird, sind auch die in den verschiedenen Zellen zersetzten Mengen des Elektrolyts einander chemisch äquivalent.

An der Kathode scheidet sich der Wasserstoff, oder das Metall, oder dem Metall ähnliche Radikale aus, z. B. $\overset{+}{H}$, $\overset{+}{Ka}$, $\overset{+}{Na}$, $\overset{+}{Hg}$, $\overset{++}{Hg}$, $\overset{++}{Fe}$, $\overset{+++}{Fe}$, $\overset{+}{NH_4}$ (CH_3) u. s. f., an der Anode der Rest des zusammengesetzten, leitenden Körpers, also z. B. $\overline{OH}$, $\overline{NO_3}$, $\overline{Cl}$, $\overline{Br}$, $\overline{J}$, $\overline{\overline{SO_4}}$, $\overline{Fe}(\overline{Cy})_6$, $\overline{Fe}(\overline{Cy})_6$ u. s. f.

Die Anzahl der Kreuze $++\ldots$ oder Striche $--\ldots$ deutet die Wertigkeit der betreffenden Ionen an. So gehört z. B. das dreiwertige Ion $\overline{Fe}(\overline{Cy})_6$ der Gruppe der Ferricyansalze, das vierwertige Ion $\overline{Fe}(\overline{Cy})_6$ der Gruppe der Ferrocyansalze an.

In vielen Fällen treten jedoch an den Elektroden sekundäre chemische Wirkungen auf.

Das Faraday'sche Gesetz wird durch die Gleichung dargestellt:

$$M = \frac{a}{k} \cdot 0{,}00001044 \cdot i \cdot t \quad \ldots \ldots \quad 1)$$

Hierin ist M die Menge des ausgeschiedenen Ions in Grammen, a das auf Wasserstoff als Einheit bezogene Atomgewicht, k die Wertigkeit des Ions im Elektrolyt, i die Stromstärke, t die Anzahl

Sekunden, während der die Zersetzung durch den Strom stattgefunden hat.

Der Zahlenfaktor h = 0,00001044 entsteht auf folgende Weise. Die Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb scheidet aus Silbernitrat $AgNO_3$ 0,0011183 *g* Silber aus. Das Atomgewicht des Silbers verhält sich zu dem des Wasserstoffes wie 107,92 : 1,008. Demnach ist h = 0,0011183 : 107,92 = 0,00001044. Das Produkt $\frac{a \cdot h}{k}$ nennt man das elektrochemische Äquivalent eines Körpers.

Tabelle der elektrochemischen Äquivalente der Elemente.

Name des Körpers	Atomgewicht	Wertigkeit	Äquivalent	Elektrochemisches Äquivalent in *g*	Ausscheidung per Stunden-Ampère in *g*
		Elektropositive Körper. Kationen.			
Aluminium	27,11	3	9,04	0,0000935	0,337
Blei	206,39	2	103,20	0,00122078	3,859
Eisen	56,02	2	28,01	0,000290	1,045
Gold	197,2	3	65,7	0,000681	2,452
Kalium	39,12	1	39,12	0,000405	1,459
Kupfer	63,60	2	31,80	0,0003289	1,184
Magnesium	24,36	2	12,18	0,000126	0,454
Natrium	23,05	1	23,05	0,000239	0,860
Nickel	58,9	2	29,45	0,000304	1,095
Platin	194,8	4	48,7	0,000504	1,814
Quecksilber	200,3	2	100,01	0,001037	3,733
Silber	107,92	1	107,92	0,0011183	4,025
Wasserstoff	1,008	1	1	0,00001044	0,03758
Zink	65,41	2	32,70	0,000339	1,220
Zinn	119,10	4	29,6	0,000307	1,105
		Elektronegative Körper. Anionen.			
Brom	79,93	1	79,93	0,000829	2,984
Chlor	35,46	1	35,46	0,000367	1,322
Jod	126,86	1	126,86	0,001314	4,730
Sauerstoff	16	2	8	0,0000829	0,298
Stickstoff	14,04	3	4,68	0,00004847	0,1745

Das elektrochemische Äquivalent ist die Menge, welche ein Strom von 1 Ampère Stärke in einer Sekunde ausscheidet.

Die Elektrizitätsmenge, welche durch jeden Querschnitt eines Leiters in dem Zeitraume einer Sekunde fliesst, wenn die Stromstärke gleich 1 Ampère ist, heisst Einheit der Elektrizitätsmenge oder 1 Coulomb.[1]) Man kann daher auch sagen: Das elektrochemische Äquivalent ist die Menge eines Stoffes, welche durch ein Coulomb ausgeschieden wird.

[1]) Für die Elektrizitätseinheit oder das Coulomb wird die Abkürzung Cb gebraucht.

Die vorstehende Tabelle giebt die in Betracht kommenden Zahlen für die wichtigsten Stoffe.

Solche Körper, welche mit verschiedener Wertigkeit in verschiedenen Verbindungsgruppen auftreten, sind selbstverständlich mit der Wertigkeit einzusetzen, die das Ion in der Verbindung besitzt, die der Elektrolyse unterworfen wird. Lässt man einen Strom nacheinander z. B. durch drei Zersetzungszellen gehen, deren erste Salzsäure, deren zweite Wasser und deren dritte Ammoniak enthält, so werden an den Kathoden aller drei Zersetzungszellen gleiche Volumina Wasserstoff entwickelt, während an den Anoden ein gleiches Volumen Chlor, $^1/_2$ Volumen Sauerstoff und $^1/_3$ Volumen Stickstoff ausgeschieden wird. Die elektrolytisch zerlegten Mengen der drei Verbindungen stehen daher in dem Verhältnisse

$$HCl, \frac{H_2O}{2}, \frac{H_3N}{3}.$$

Ebenso werden z. B. aus allen Metallchloriden gleiche Mengen Chlor ausgeschieden, während die Menge der an der Kathode ausgeschiedenen Metalle ihrer chemischen Valenz in der elektrolysierten Verbindung entsprechen. Die elektrolytisch zerlegten Mengen der nachstehend angeführten Salze stehen daher in folgendem Verhältnisse:

$$Ag NO_3, \frac{Cu Cl_2}{2}, \frac{Cu_2 Cl_2}{2}, \frac{Fe_2 Cl_6}{6}, \frac{Hg Cl_2}{2}, \frac{Hg_2 (NO_3)_2}{2}.$$

Demnach werden auf 1 Volumenteil oder 35,46 Gewichtsteile Chlor aus dem Kupferchlorid ($Cu'' Cl_2$) 31,8 Gewichtsteile Kupfer, aus dem Kupferchlorür ($Cu' Cl$) aber 63,6 Gewichtsteile Kupfer ausgeschieden. Derselbe Strom scheidet ferner aus Quecksilberchlorid ($\overset{++}{Hg} Cl_2$) 100,1 Teile Quecksilber, aus Merkuronitrat ($\overset{+}{Hg} NO_3$) aber 200,3 Gewichtsteile Quecksilber aus.

Das Faraday'sche Gesetz hat sich sowohl hinsichtlich der Proportionalität zwischen zersetzter Stoffmenge und hindurchgegangener Elektrizitätsmenge, als auch hinsichtlich der chemischen Äquivalenz der ausgeschiedenen Mengen der Ionen als absolut genau erwiesen.

Um gerade ein in Grammen ausgedrücktes Äquivalent einer chemischen Verbindung zu zersetzen, ist eine Elektrizitätsmenge von 96540 Coulomb erforderlich. Mit einem Grammäquivalent eines Elektrolyten wandert eine Elektrizitätsmenge von 96500 Coulomb. Denn 1 Coulomb (1 Ampère Stromstärke in 1 Sekunde) scheidet 0,001183 *g* Silber aus; 1 Grammäquivalent Silbernitrat wiegt 169,98 *g*; bei der Zersetzung dieser Gewichtsmenge Silbernitrat wird 1 Grammäquivalent, das sind 107,92 *g*, Silber ausgeschieden; somit ist 107,92 : 0,0011183 = 96500 Coulomb die e l e k t r o c h e m i s c h e E i n h e i t d e r S t r o m s t ä r k e.

Bei gemischten Körpern, wie die Lösungen von Säuren, Basen und Salzen solche vorstellen, wird stets das Ion ausgeschieden, zu dessen Ausscheidung die geringste EMK nötig ist. Salzsäurelösung giebt z. B. H und Cl.

4. Voltameter als Strommesser.

Die Thatsache, dass ein Strom von bestimmter Stärke in gleicher Zeit immer eine ihrer Grösse nach ganz genau bekannte chemische Wirkung hervorbringt, wird häufig benutzt, um in einfacher Weise Stromstärken auf chemischem Wege zu messen, und die hierzu bestimmten Apparate heissen, wie bereits erwähnt, Voltameter.

a) Das Knallgasvoltameter benutzt man mit Vorteil für stärkere Ströme.

Unter den verschiedenen Formen, in welchen dieser Apparat angewendet wird, ist in der Elektrotechnik die von Fr. Kohlrausch herrührende die weitaus beliebteste. Dieses Voltameter kann mit Vorteil zur Messung von Stromstärken zwischen etwa 3 und 50 Ampère verwendet werden. (Vergl. Fig. 38.)

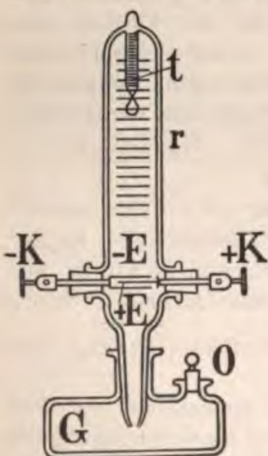


Fig. 38. Knallgasvoltameter nach F. Kohlrausch.

Ein etwa 40 *mm* weites Glasrohr r ist in je 5 *ccm* geteilt, zusammen 300 *ccm*. Ein verengerter Fortsatz des Rohres ist in den Hals eines zweiten Gefässes G gut eingeschliffen. Um das Rohr mit Flüssigkeit zu füllen, wird der ganze Apparat einfach umgekehrt, wobei, um ein Ausfliessen der Flüssigkeit zu verhüten, die seitliche Öffnung o des Standgefässes mit einem Stopfen geschlossen wird. Wenn eine Messung vorgenommen werden soll, wird vorher die Öffnung o wieder aufgemacht.

Ein in das Messrohr eingeschmolzenes kleines Thermometer t gestattet die Temperatur des entwickelten Knallgases zu messen.

Die Platinelektroden werden mit durchbohrten Kautschukstopfen durch zwei an das Rohr angeblasene Seitenöffnungen +E und —E in das Gasentwickelungsgefäss eingeführt. Die positive Elektrode ist ein 17 *mm* breites und 40 *mm* langes Platinblech, welches von zwei ebenso grossen Platten, die zusammen die andere Elektrode bilden, umschlossen wird. Der Abstand zwischen beiden Elektroden beträgt beiderseitig ungefähr 3 *mm*.

Beim Gebrauche stehen die Elektroden selbstverständlich nicht, wie in der Zeichnung, horizontal, sondern vertikal. Die Elektroden sind mit Gold an innen geschlossene, 30 *mm* lange Platinröhren angelötet, die durch die Kautschukstopfen hindurchgehen. In diese Platinrohre passen mit Klemmen +k, —k versehene Kupferdrähte genau hinein.

Man füllt das Voltameter mit Schwefelsäure, die ein spezifisches Gewicht von 1,14 bei 15° C. besitzt (durch Mischung von 20 Teilen reiner Schwefelsäure mit 80 Teilen destillierten Wassers).

Ist der Apparat zum Gebrauche fertig, so schliesst man nach einer Sekundenuhr den Strom und lässt ihn so lange hindurch gehen, bis das Messgefäss nahezu bis zum Ende der Teilung mit Knallgas gefüllt ist.

Das entwickelte Knallgasvolumen muss nunmehr auf 0° C. und 760 *mm* Barometerstand reduziert werden.

Beträgt der Barometerstand (auf 0° reduziert) b *mm* und die Höhe der Säure im Rohre über der Säure im unteren Gefässe h *mm*, so steht das Gas unter einem Drucke

$$p = b - \frac{1,14}{13,6} \cdot h = b - \frac{1}{12} h.$$

Das abgelesene Gasvolumen sei V *ccm*, die Temperatur t, alsdann ist das auf 0° und 760 *mm* reduzierte Gasvolumen V_0

$$V_0 = V \cdot \frac{(b - \frac{1}{12} h) \cdot 273}{760 \cdot (273 + t)}$$

War nun T Sekunden lang der Strom durch das Voltameter hindurchgegangen, so ist die zu messende Stromstärke i

$$i = V \cdot \frac{(b - \frac{1}{12} h) \cdot 273}{0,174 \cdot T \cdot 760 \cdot (273 + t)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Beispiel: V = 198,0; t = 17,8° C.; b = 754 *mm*; T = 39,0 Sekunden. Die Säure steht im Rohre 112 *mm* höher als im Gefässe. Alsdann ist:

$$i = \frac{198,0 \cdot (754 - \frac{1}{12} \cdot 112) \cdot 760 \cdot 273}{0,174 \cdot 39 \cdot (273 + 17,8)} = 26,8 \text{ A.}$$

Um eine für die Praxis ausreichende Genauigkeit des Ergebnisses von $^1/_2$ % zu erlangen, müssen die Temperaturen t auf ganze Grade, die Drücke b auf 4 *mm* genau bekannt sein.

Die hier auftretende Zahl 0,174 ist das Volumen Knallgas in Kubikcentimetern (auf 0° und 760 *mm* Barometerstand reduziert),

das von 1 Ampère in einer Sekunde entwickelt wird. In einer Minute entwickelt 1 Ampère 10,44 *ccm* Knallgas (auf 0° und 760 *mm* Druck reduziert.[1])

b) Das Kupfervoltameter.

In eine Lösung, welche dadurch hergestellt wird, dass man konzentriertes Kupfervitriol so lange mit destilliertem Wasser verdünnt, bis das spezifische Gewicht der Lösung bei 18° C. 1,21 beträgt,[2]) lässt man zwei grössere dünne Platten aus reinem elektrolytischen Kupfer eintauchen, die man vor und nach dem Versuche auf einer guten Wage von grösserer Tragkraft genau wägt. Auf 1 *qdm* freie Oberfläche der Platten kann ein Strom von 7 Ampère gerechnet werden. Die Platten werden am besten von quadratischer oder rechteckiger Form gewählt und sollen voneinander mindestens 3 *cm* abstehen. Die Flüssigkeit soll während des Versuches tüchtig umgerührt werden.

Man lässt den zu messenden Strom von der Stärke i eine bestimmte Zeit von t Sekunden durch das Kupfervoltameter hindurchgehen, dann nimmt die Anode für jedes Ampère Stromstärke in jeder Sekunde um 0,328 *mg*, im ganzen um q *mg* ab und die Kathode um ebensoviel an Gewicht zu. Man hat somit:

$$i = \frac{q}{0,328 \cdot t} \qquad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Die Platten werden nach Schluss des Versuches sorgfältig mit Wasser abgespült, zwischen Fliesspapier getrocknet und hierauf gewogen.



Fig. 39. Kupfervoltameter.

Man darf weder die Flüssigkeit während des Versuches, noch die Platten beim Trocknen erwärmen, da das elektrolytisch niedergeschlagene Kupfer leicht oxydiert.

Das Kupfervoltameter hat den Nachteil, dass, zumal bei grösseren Stromstärken, der Apparat häufig selbst dem Strome einen grösseren und mit der Dauer des Versuches zunehmenden Widerstand entgegensetzt, sodass es schwierig ist, die Stromstärke unveränderlich zu erhalten.

Nebenstehende Fig. 39 stellt ein einfaches Kupfervoltameter dar, an dem die herausnehmbaren Kupferplatten durch Federdruck festgehalten werden.

[1]) Die hier beschriebenen sehr zweckmässigen Knallgasvoltameter nach F. Kohlrausch können von der Firma Hartmann & Braun, Bockenheim bei Frankfurt a. M. bezogen werden.

[2]) In dieser Konzentration besitzt Kupfervitriollösung den geringsten Leitungswiderstand.

Beispiel: In einem Zeitraume von 9 Minuten 36 Sekunden hat die Kathode eines Kupfervoltameters um 7,91 *g* an Gewicht zugenommen. Wie gross war während dieser Zeit durchschnittlich die Stromstärke?

$$i = \frac{7,91}{0,000328 \cdot 576} = 41,9 \text{ A.}$$

c) Das Silbervoltameter.

Zur genauen Messung schwacher Stromstärken ist besonders das Silbervoltameter sehr geeignet, da einerseits die Gewichtsmenge des ausgeschiedenen Silbers verhältnismässig gross ist, und anderseits das ausgeschiedene Silber leicht rein erhalten werden kann. Ganz besonders zur Aichung der Torsionsgalvanometer von Siemens & Halske, eines der beliebtesten Instrumente der praktischen Elektrotechniker, oder der Präzisionsspannungsmesser und ähnlicher Instrumente wird das Silbervoltameter mit Vorliebe verwendet.

Das Silbervoltameter besteht aus einer kleinen Platinschale (P in Fig. 40), die mit dem negativen Pole der Stromquelle verbunden



Fig. 40. Silbervoltameter.

wird. In unserer Figur steht z. B. der Platintiegel auf einer mit der Klemmschraube k_2 leitend verbundenen Unterlage M und wird durch 3 Federn f in seiner Lage festgehalten. In die Schale giesst man eine Lösung von chemisch reinem, salpetersaurem Silber (10 bis 20 Teile Höllenstein auf 100 Teile Wasser). In diese Lösung

taucht ein reiner Silberstift oder ein dünnes Silberschälchen S, das von einem Kupferhalter B getragen wird. Der ganze Apparat steht auf einer Hartgummiplatte E. Während sich bei dem Durchgange des Stromes Silber aus der Lösung auf der Innenseite der Schale niederschlägt, wird gleichzeitig ebensoviel Silber von dem Stifte oder dem Schälchen aufgelöst. Während des Versuches fallen leicht kleine Silberteile von dem Silbertiegel oder Silberstabe ab, deshalb umgiebt man denselben mit einer dünnen Hülle aus Pergamentpapier oder dünner, mit destilliertem Wasser sorgfältig ausgewaschener Leinwand.

Um sich vor Fehlern, die von Temperaturschwankungen herrühren können, einigermassen sicher zu stellen, schaltet man vor das Silbervoltameter einen Widerstand von mindestens 30 bis 40 Ohm.

Bei einer Stromstärke von 0,5 bis 1,5 Ampère für je 1 *qdm* Oberfläche erhält man die besten Niederschläge. Durch einen Vorversuch bestimmt man daher die Grösse der für den Versuch zu wählenden Batterie (am besten Akkumulatorenzellen). Ist der Versuch beendet, so giesst man die Höllensteinlösung ab und wäscht den Tiegel so lange mit heissem, destilliertem Wasser sorgfältig aus, bis die Waschwässer bei Zusatz von Salzsäure keine Spur einer Trübung zeigen. Hierauf erwärmt man den Tiegel vorsichtig, damit er vollständig trocknet, lässt im Exsiccator abkühlen und bestimmt die Gewichtszunahme auf einer genauen Wage (die noch $^1/_5$ *mg* deutlich zu erkennen gestattet).

Ist q die Gewichtszunahme des Platintiegels in Grammen, t die Anzahl Sekunden, während deren der Strom durch das Silbervoltameter hindurch gegangen ist, so findet man die gesuchte Stromstärke durch die Formel:

$$i = \frac{q}{t \cdot 0{,}001118} \qquad \qquad 4)$$

Beispiel: Der Platintiegel wog vor dem Versuche 30,7250 *g*. Nachdem der zu messende Strom 10 Minuten lang durch das Voltameter gegangen war, wog der Tiegel 31,6250 *g*. Wie gross war die Stromstärke?

Die Gewichtsdifferenz q des Tiegels beträgt 0,9000 *g*, die Zeit t gleich 10 · 60 = 600 Sekunden, somit ist

$$i = \frac{0{,}9000}{600 \cdot 0{,}001118} = 1{,}343 \text{ A.}$$

5. Sekundäre Wirkungen der Elektrolyse.

Am einfachsten gestalten sich die chemischen Vorgänge bei der Elektrolyse geschmolzener Haloidverbindungen der Metalle, z. B. des Chlormagnesiums bei Anwendung von Kohlenelektroden. An der negativen Elektrode scheidet sich das Magnesium als reines Metall ab, an der positiven Elektrode wird Chlor frei und entweicht aus der geschmolzenen Masse als grüngelbes Gas.

In allen Fällen, in welchen es sich um die Elektrolyse gelöster Salze handelt, treten verwickeltere Vorgänge auf, dadurch, dass die durch den Strom an den Elektroden ausgeschiedenen Substanzen auf das Lösungsmittel, das Wasser, oder die Substanz der Elektroden einwirken. Diese Einwirkungen werden dadurch besonders begünstigt, dass die Substanzen, wenn sie gerade aus einer Verbindung austreten (*in statu nascendi*), oder beim Übergang aus dem Zustand der Ionisation in den gewöhnlichen Zustand, eine grössere Fähigkeit besitzen mit anderen Körpern Verbindungen einzugehen, als dies sonst unter gewöhnlichen Verhältnissen der Fall ist.

Wenn wir z. B. eine wässrige Lösung von Salzsäure ($H\,Cl$) elektrolysieren, so wandert das Chlor an die positive Elektrode und wird, wenn diese aus einem Metall besteht, welches sich mit Chlor zu verbinden imstande ist, mit diesem sich vereinigen; das Wasserstoffgas hingegen wird die negative Elektrode zunächst in Form von Bläschen bedecken, und schliesslich werden diese Bläschen in der Flüssigkeit aufsteigen und entweichen. Hier hätte somit eine sekundäre Wirkung nur an der positiven Elektrode stattgefunden, weil das Chlor nicht ebenfalls entwichen ist, sondern sich mit dem Metall der Anode verbunden hat.

Wenn man Kupfersulfat ($Cu\,SO_4$) in einer Zersetzungszelle elektrolysiert, die mit Platinelektroden ausgestattet ist, so zerfällt das $Cu\,SO_4$; Cu wandert an den negativen Pol, der Rest SO_4 wirkt, wenn er aus dem Zustande der Ionisation in den gewöhnlichen Zustand übergeht, zersetzend auf das Lösungsmittel, das Wasser ($H_2\,O$), ein, entzieht demselben zwei Atome Wasserstoff und bildet Schwefelsäure ($H_2\,SO_4$); der übrig bleibende Sauerstoff wird frei und entweicht an dem positiven Pole. Das Platinblech, welches die negative Elektrode bildet, überzieht sich mit einer Schicht galvanisch niedergeschlagenen Kupfers; an der positiven Elektrode aber sammelt sich Schwefelsäure an, deren Konzentration während der Elektrolyse wächst, während Sauerstoff entweicht. In diesem Falle hat die sekundäre Wirkung ebenfalls am positiven Pole stattgefunden.

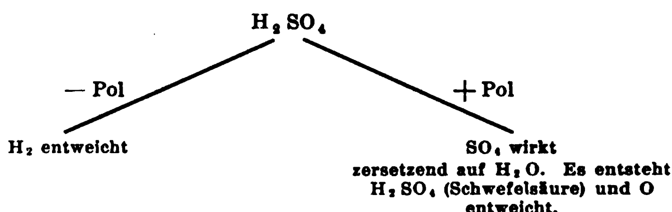
Etwas anders gestaltet sich die Sache, wenn man dieselbe Verbindung, das Kupfersulfat, unter Verwendung von Kupferelektroden den chemischen Wirkungen des Stromes aussetzt. Genau wie vorher überzieht sich die Kathode mit Kupfer; sie nimmt dadurch an Gewicht zu, aber sie verändert ihren chemischen Charakter nicht. An der Anode scheidet sich ganz wie vorher Sauerstoff und Schwefelsäure aus; die Schwefelsäure aber verbindet sich mit dem Kupfer, indem sie gleichzeitig $Cu\,SO_4$ bildet.

Ist die Kupfervitriollösung ursprünglich nicht konzentriert, so wird sich die Anode alsbald mit konzentrierter Lösung umgeben, während

der Salzgehalt nach der Kathode hin stetig abnimmt; zu der chemischen sekundären Wirkung tritt somit noch die physikalische hinzu, dass die vorher gleiche Dichtigkeit der Flüssigkeit einer ungleichförmigen Anordnung der Salzteile in dem Wasser gewichen ist. Dazu kommt, dass sich berührende Lösungen derselben Substanz, aber verschiedener Konzentration, infolge des Diffusionsvorganges zur Entstehung schwacher elektromotorischer Kräfte Anlass geben.

Eine sekundäre chemische Wirkung an der negativen Elektrode findet statt, wenn man z. B. Kupferchlorid $CuCl_2$ elektrolysiert und als Elektroden Kohlenplatten verwendet. Die Zersetzung liefert Cu an der Kathode; dieses scheidet sich aber nicht als Metall aus, sondern bildet mit dem Kupferchlorid zusammen Cu_2Cl_2 Kupferchlorür. An der Anode entweicht gasförmiges Chlor.

Auch die Wasserzersetzung, welche gewöhnlich als einfacher Versuch im Unterrichte vorgeführt wird, vollzieht sich wahrscheinlich nicht unmittelbar, sondern nur als eine sekundäre Wirkung der Zersetzung der im Wasser gelösten Säure. Diese Zersetzung vollzieht sich, wenn man z. B. Wasser, das mit Schwefelsäure angesäuert ist, elektrolysiert, nach folgendem Schema:



Wir wollen übrigens nicht verschweigen, dass neuere Elektrochemiker[1]) auch wiederum der Ansicht zuneigen, dass das Wasser bei der Elektrolyse von Lösungen primär zersetzt wird.

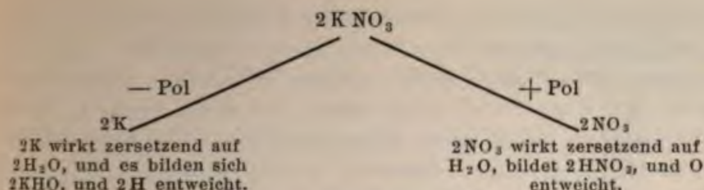
Ganz reines Wasser scheint den Strom überhaupt fast gar nicht zu leiten.[2]) Eine unmittelbare Zersetzung chemisch reinen Wassers ist noch nicht beobachtet worden.

Wenn wir eine wässrige Lösung von Kalisalpeter (KNO_3) elektrolysieren, treten sekundäre chemische Wirkungen an beiden Elektroden auf. Der Vorgang vollzieht sich auf folgende Weise:

[1]) Vergleiche Le Blanc, Lehrbuch der Elektrochemie, Leipzig, Oskar Leiner, 2. Aufl., S. 235.

[2]) Fr. Kohlrausch fand die spezifische Leitfähigkeit (in reziproken Siemenseinheiten ausgedrückt) sorgfältigst gereinigten Wassers bei

$0^0 = 0{,}014 \cdot 10^{-10}$ und bei $50^0 = 0{,}176 \cdot 10^{-10}$.



An der Kathode bildet sich Kalilauge, und Wasserstoff entweicht; an der Anode entsteht Salpetersäure, während Sauerstoff entwickelt wird. Das Ergebnis ist also auch in diesem zweiten Falle eine Wasserzersetzung.

Nach der Elektrolyse hat man aber nicht mehr eine reine Lösung von Kalisalpeter, sondern eine Mischung dieser Substanz mit verdünnter Kalilauge, beziehentlich verdünnter Salpetersäure vor sich.

Gelegentlich entstehen auch noch sekundäre Wirkungen anderer Art. Metalle werden z. B. in Pulverform ausgeschieden, Sauerstoff wird in seiner aktiven Form als Ozon entwickelt, auch Wasserstoff tritt häufig in einer Form auf, in der er mehr als sonst das Bestreben besitzt, sich mit anderen Körpern zu verbinden. Wir erwähnten ferner bereits, dass nicht selten durch die Elektrolyse lokale Änderungen des Konzentrationsgehaltes der Flüssigkeiten hervorgerufen werden.

6. Die galvanische Polarisation.

Wenn der elektrische Strom durch eine chemische Verbindung hindurchgeht und dieselbe in ihre Bestandteile zersetzt, so leistet er dabei insofern eine Arbeit, als er die Ionen trennt, elektrisch ladet und in der widerstehenden Flüssigkeit fortbewegt.[1]) Das Streben der durch die Elektrolyse ausgeschiedenen, elektrisch neutralen Bestandteile, aufs neue in den Zustand elektrisch geladener Ionen zurückzukehren, macht sich geltend als eine an den Elektroden der Zersetzungszelle wirksame elektromotorische Gegenkraft; diese nennt man galvanische Polarisation.

Die entstehende elektromotorische Gegenkraft wirkt schwächend auf die EMK der Elektrizitätsquelle, durch welche der elektrolytische Vorgang veranlasst wird.

Schaltet man die Elektrizitätsquelle aus und verbindet die Elektroden der Zersetzungszelle durch einen Leiter, so fliesst in diesem und in der Zelle ein Strom, dessen Richtung derjenigen des die vorhergehende Elektrolyse bewerkstelligenden Stromes entgegengesetzt ist. Dieser Polarisationsstrom nimmt rasch an Stärke ab.

---

[1]) Vergl. auch Abschn. 10 dieses Kapitels, S. 98.

Wendet man einen polarisierenden Strom an, dessen EMK, von Null anfangend, allmählich wächst, so ist anfänglich die EMK der Polarisation der primären EMK gleich. Erst wenn jene höher wird, bleibt die EMK der Polarisation mehr und mehr zurück; sie wächst aber, wenn jene steigt, noch immer langsam, ohne ein bestimmt angebbares Maximum zu erreichen.

Das Verhältnis der bei einer Entladung der polarisierten Elektroden bewegten Elektrizitätsmenge zur ursprünglichen Spannungsdifferenz der Elektroden nennt man die elektrolytische Kapazität der Zersetzungszelle. Diese Kapazität ist so beträchtlich, dass man in der Wechselstromtechnik von derselben erfolgreiche praktische Anwendung gemacht hat. Die elektrostatische Kapazität der Elektroden der Zersetzungszelle ist im Vergleich zu dieser elektrolytischen Kapazität eine verschwindend kleine Grösse.

In einem Stromkreise, in dem eine Zersetzungszelle vorhanden ist, nimmt das Ohm'sche Gesetz die Gestalt an:

$$i = \frac{E - e}{w} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

wenn i die Stromstärke, w der Gesamtwiderstand des Stromkreises, E die EMK der Elektrizitätsquelle und e die EMK der Polarisation ist. Multipliziert man die Gleichung 5) mit i und ordnet sie etwas anders, so nimmt sie die Gestalt an:

$$E \cdot i = i^2 \cdot w + e \cdot i \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

Hierin ist E i die überhaupt aufgewendete elektrische Energie, $i^2 w$ der Teil derselben, der in der Zelle zur Erwärmung des Leiters nach dem Joule'schen Gesetz verwendet wird; e i ist der durch die chemischen Vorgänge in der Zelle verbrauchte Anteil. Es ist e i die Verbindungswärme der Menge des Elektrolyten, die in einer Sekunde zersetzt worden ist.

Die Grösse e ist das Produkt aus dem elektrochemischen Äquivalent p des Elektrolyten und der Verbindungswärme q der Gewichtseinheit, d. i. die Wärmetönung der zerlegten Verbindung

$$e = p \cdot q = W \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7)$$

Dieser Ausdruck ist das sogenannte Thomson-Helmholtz'sche Gesetz, von dem inzwischen jedoch erkannt worden ist, dass es nur in sehr roher Annäherung giltig ist.

Nach diesem Gesetze müsste es, um die Zersetzung einer Verbindung einzuleiten, ein gewisses Minimum der EMK E = e geben. Es ist aber bekannt, dass man mit einer beliebig niedrigen EMK die Elektrolyse einleiten kann.

Die nach dem Joule'schen Gesetze entwickelte Wärme $i^2 \cdot w$ ist nämlich zumeist nicht der einzige Wärmevorgang, der sich in der

Zersetzungszelle abspielt. Die Anwesenheit der Ionen auf den Elektroden giebt zu kontaktelektrischen Vorgängen Anlass, die thermoelektrische Wärmeprozesse nach dem Peltier'schen Gesetze zur Folge haben.

Bezeichnet man die algebraische Summe dieser E M Kräfte mit ε, so nimmt das Ohm'sche Gesetz die Form

$$i = \frac{E - (e + \varepsilon)}{w} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8)$$

an, aus der sich ergiebt:

$$E\,i = i^2 \cdot w + e \cdot i + \varepsilon \cdot i \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9)$$

Man erkennt hieraus, dass die Berechnung der E M K der Polarisation aus dem Thomson-Helmholtz'schen Gesetze eine Anzahl von Korrektionen nötig macht, auch wenn sekundäre Prozesse, wie chemische Einwirkung der Ionen auf die Elektroden, Okklusion von Gasen, Bildung von Niederschlägen etc., die besonders berücksichtigt werden müssten, gar nicht in Frage kommen.

Immerhin tritt meist eine merkliche, dauernde Zersetzung des Elektrolyten durch den Strom erst dann ein, wenn das aus der Wärmetönung des Elektrolyten berechnete Minimum der E M K, der Zersetzungswert der Verbindung, überschritten worden ist. Bei niedrigeren E M Kräften beginnt zwar die Elektrolyse schon, bald aber wird die Stromstärke durch die entgegenwirkende Polarisation fast auf Null zurück gebracht. Da durch Diffusion immer die Konzentration der an den Elektroden ausgeschiedenen Stoffe vermindert wird, kann ein ganz schwacher Strom dauernd zustande kommen.

7. Theoretische Berechnung der elektromotorischen Kraft.

Unwillkürlich wird man dadurch auf die Frage geführt, ob es überhaupt nicht möglich sei, die von einem galvanischen Elemente zu gewinnende elektrische Energie aus der verbrauchten chemischen Energie, d. h. aus den Verbindungswärmen oder Wärmetönungen, zu berechnen.

Die ursprüngliche Annahme von von Helmholtz und William Thomson (Lord Kelvin), dass sich die durch die chemischen Prozesse im Elemente erzeugten Wärmemengen einfach vollständig in chemische Energie umsetzten, hat sich nicht bestätigt. Durch Untersuchungen von Braun, Gibbs und von Helmholtz selbst und von Jahn ist nachgewiesen worden, dass nur in wenigen Ausnahmefällen der Vorgang in so einfacher Weise sich vollzieht, nämlich dann, wenn die E M K des Elementes von der Temperatur unabhängig ist.

Steigt aber die E M K des Elementes mit der Temperatur, so ist die chemische Wärme kleiner als die elektrische Arbeit; man muss somit dem Elemente Wärme zuführen, wenn seine Temperatur konstant bleiben soll.

Sinkt die E M K mit steigender Temperatur, so arbeitet das Element mit Wärmeentwickelung, die verbrauchte chemische Energie ist grösser als die geleistete chemische Arbeit.

Sekundäre Vorgänge im Elemente, besonders thermoelektrische Erscheinungen an den Berührungsflächen der Metalle und der Flüssigkeiten scheinen die Ursache dieser Unterschiede zu sein.

Also nur auf den vorher erwähnten Ausnahmefall bezieht sich, streng genommen, die nachstehende Berechnung. Sie gestattet in verhältnismässig vielen Fällen eine angenäherte Schätzung.

Beträgt die elektromotorische Gegenkraft infolge des Vereinigungsstrebens der ausgeschiedenen Ionen oder die Polarisation D (der Buchstabe D wird benutzt, weil es sich in diesem Falle ebenfalls um eine Potentialdifferenz handelt), so wird, wenn eine Elektrizitätsmenge von q Coulomb durch die Zersetzungszelle hindurchwandert, eine elektrische Arbeit von dem Betrage $q \cdot D$[1]) geleistet.

Für diesen Arbeitsbetrag kann aber noch ein anderer Ausdruck gefunden werden. Wenn die Elektrizitätsmenge q z. B. durch eine Wasserzersetzungszelle hindurchgeht, so werden $q \cdot 0{,}00001044$ *g* Wasserstoff an der Kathode ausgeschieden. Diese aber erzeugen, wenn sie mit dem an der Anode abgeschiedenen Sauerstoff zu Wasser wieder vereinigt werden, $q \cdot 0{,}00001044 \cdot h$ Wärmeeinheiten, wenn man mit h die Wärmemenge bezeichnet, die entwickelt wird, wenn 1 *g* des Kations (z. B. 1 *g* Wasserstoff) mit der äquivalenten Menge des Anions (z. B. 8 *g* Sauerstoff) wieder vereinigt werden. Diese Wärmemenge kann ohne weiteres ebenfalls in Arbeit verwandelt werden, wenn wir berücksichtigen, dass $42 \cdot 10^6$ absolute Arbeitseinheiten des Centimeter - Gramm - Sekunden - Systems erforderlich sind, um eine Wärmeeinheit, d. i. eine Gramm - Kalorie, zu erzeugen.[2]) Auf diese Weise ergiebt sich die Gleichung:

$$D \cdot q = q \cdot 0{,}00001044 \cdot h \cdot 42 \cdot 10^6, \text{ oder } D = 0{,}00001044 \cdot h \cdot 42 \cdot 10^6.$$

Eine ähnliche Gleichung, wie wir sie hier für Wasserstoff aufgestellt haben, kann für jedes beliebige andere Element aufgestellt werden, wenn wir das elektrochemische Äquivalent des Wasserstoffes durch das des betreffenden Elementes ersetzen. Bekanntlich ist nun aber das elektrochemische Äquivalent das Produkt aus dem elektrochemischen Äquivalent des Wasserstoffes mal dem Quotienten $\frac{a}{k}$[3]).

[1]) Man vergl. I, 5, S. 3.
[2]) Man vergl. II, 4, Gleichung 9, S. 37.
[3]) Man vergl. IV, 3, S. 82.

wenn a das Atomgewicht und k die Wertigkeit des betreffenden Elementes bedeutet.

Da die Elektrizitätsmenge q aus der Gleichung verschwindet, erhält man zum Schluss:

$$D = 0{,}00001044 \cdot 42 \cdot 10^6 \cdot h \cdot \frac{a}{k} \quad \ldots\ldots \quad 10)$$

Dies ergiebt den Satz: Die elektromotorische Kraft, die einem elektrochemischen (Bildung oder Zerlegung) Vorgange entspricht, wird annähernd gefunden, wenn man das Produkt aus dem elektrochemischen Äquivalente des getrennten Ions und der im Arbeitsmass ausgedrückten Verbindungswärme von 1 *g* des Kations bildet.

Das Produkt a · h aus dem Atomgewicht und der Verbindungswärme von 1 *g* führt in der physikalischen Chemie den Namen »Wärmetönung«. Unter Wärmetönung des Zinks bei Bildung von Zinksulfat versteht man z. B. die Anzahl von Grammkalorien, die entwickelt werden, wenn ein Grammatom, das sind 64,9 *g* Zink, mit der erforderlichen Menge Schwefelsäure zu Zinksulfat verbunden wird. Diese Wärmemenge beträgt 108000 Kalorien.

Bezeichnet man die Wärmetönung der Verbindung mit W, mit k die Anzahl der bei der Zerlegung einer Grammmolekel entstehenden Grammäquivalente und drückt man D in Volt aus, so hat man:

$$D = 0{,}0000439 \cdot \frac{W}{k} \quad \ldots\ldots \quad 11)$$

1. Beispiel: Die EMK der Polarisation der Wasserzersetzung zu berechnen. Für Wasserstoff ist, wie bereits mehrfach erwähnt, das elektrochemische Äquivalent z = 0,00001044. Wenn 1 *g* Wasserstoff sich mit 8 *g* Sauerstoff zu Wasser verbindet, werden 34000 Kalorien entwickelt. Wir erhalten daher nach Gleichung 5:

$$D = 0{,}00001044 \cdot 34\,000 \cdot 1 \cdot 42 \cdot 10^6.$$

Dies giebt ausgerechnet: $D = 1{,}49 \cdot 10^8$. Da man 10^8 absolute Krafteinheiten ein Volt nennt, ist 1,49 Volt die berechnete EMK der Polarisation der Wasserzersetzung. Versuche haben eine ähnliche Zahl für den Zersetzungswert ergeben.

Die Berechnung nach Gleichung 11) ergiebt ebenfalls:

$$D = 0{,}0000439 \cdot \frac{34\,000}{1} = 1{,}49 \text{ Volt}.$$

2. Beispiel: Berechnung der EMK eines Daniell-Elementes. Bei einem Daniell-Element befindet sich Kupfer in einer konzentrierten Lösung von Kupfervitriol, Zink in einer konzentrierten Lösung von Zinkvitriol, und beide Flüssigkeiten sind durch eine poröse Scheidewand voneinander getrennt. Der chemische Prozess in diesem Elemente besteht darin, dass sich an dem negativen Pole Zink in Schwefelsäure auflöst, und gleichzeitig eine äquivalente Menge Kupfer an dem positiven Pole niedergeschlagen wird. Die EMK dieses Elementes ändert sich nur wenig mit der Temperatur; man kann daher die Thomson-Helmholtz'sche Regel näherungsweise auf dasselbe anwenden.

Die Differenz der Verbindungswärmen des Zinksulfates und des Kupfersulfates entspricht angenähert der EMK des Elementes. Nun beträgt die Wärmetönung des Zinks bei der Auflösung in wässeriger Schwefelsäure 108000 Kalorien, die Wärmetönung des Kupfers bei Auflösung in verdünnter Schwefelsäure 55500 Kalorien.

Der Unterschied der beiden Wärmetönungen beträgt 52500 Kalorien. Multipliziert man diese Differenz mit denselben Faktoren, die wir vorhin bei der Berechnung der EMK der Polarisation der Wasserzersetzung zur Anwendung gebracht haben, und berücksichtigt, dass die Wertigkeit beider Elemente, des Zinks und des Kupfers, gleich 2 ist, so finden wir nach Gleichung 6:

$$D = 0{,}0000439 \cdot \frac{52500}{2} = 1{,}13 \text{ Volt},$$

d. h. die EMK des Daniell-Elementes berechnet sich zu ungefähr 1,13 Volt, und das stimmt mit den Ergebnissen der Versuche nahe überein.

8. Polarisation in galvanischen Elementen.

Verwenden wir ein galvanisches Element als Stromquelle, so fliesst der Strom nicht nur durch den äusseren Leitungsdraht, sondern auch durch das Element selbst hindurch und wirkt auf dieses Element wie auf eine Zersetzungszelle. Infolgedessen scheidet sich an der Eintrittsstelle des Stromes in das Element, d. h. an dem negativen Pole, das Anion, an der Austrittsstelle des Stromes, d. h. dem positiven Pole des Elementes, das Kation aus. Da wir nun in fast allen galvanischen Elementen in Wasser gelöste Säuren, Alkalien oder Salze verwenden, so handelt es sich zumeist um eine Wasserzersetzung, bei der an dem Zink Sauerstoff und an dem positiven Pole (Kupfer, Platin, Kohle) Wasserstoff ausgeschieden wird. Daher entsteht in den meisten galvanischen Elementen alsbald, nachdem sie in Thätigkeit gesetzt worden sind, durch die ausgeschiedenen Ionen eine elektromotorische Gegenkraft, eine Polarisation, durch welche die wirksame elektromotorische Kraft und damit auch die Stromstärke vermindert wird.

Besonders ist es der an dem positiven Pole sich ausscheidende Wasserstoff, von dem der Hauptteil der polarisierenden Wirkung herrührt. Die Bestrebungen der praktischen Elektriker sind daher besonders darauf gerichtet gewesen, den ausgeschiedenen freien Wasserstoff zu binden. Die Mittel, welche angewendet werden, um diesen Zweck zu erreichen, nennt man depolarisierende Mittel. Man setzt z. B. die Kohle in konzentrierte Salpetersäure oder Chromsäure, oder umgiebt sie mit Braunstein, damit der Sauerstoff dieser Körper sich mit dem elektrolytisch entwickelten Wasserstoff verbindet und somit die polarisierende Wirkung desselben verhindert. Auch lebhafte Bewegung der Elektroden wirkt depolarisierend, weil die ausgeschiedenen Gasblasen sich beim Erschüttern loslösen und ent-

weichen, und ferner die umgebende Flüssigkeit das Gas von der Oberfläche der bewegten Platte abwäscht und auflöst.

Von besonderer Bedeutung für die Verminderung der Polarisation ist auch die Eigenschaft der Kohle, für Gase stark durchlässig zu sein. Kohle führt den an ihrer Oberfläche ausgeschiedenen Wasserstoff schnell in die Atmosphäre fort und verhindert so eine übermässige Anhäufung von elektrisch geladenen, im Wasser aufgelösten Wasserstoffionen, durch die sonst die Ausscheidung neuer Wasserstoffionen erschwert, die E M K also herabgedrückt wird.

Auch der in der Flüssigkeit des Elementes durch Absorption gelöste atmosphärische Sauerstoff wirkt auf den an dem positiven Pole des Elementes ausgeschiedenen Wasserstoff ein, verbindet sich mit diesem zu Wasser und wirkt so ebenfalls depolarisierend. In derselben Weise wie der gelöste atmosphärische Sauerstoff wirkt auch der an der negativen Platte des galvanischen Elementes ausgeschiedene Sauerstoff; ein Teil desselben löst sich in der die Platte umgebenden Flüssigkeit auf, gelangt durch Strömungen und Diffusion an die positive Platte und vereinigt sich dort mit dem Wasserstoff. Daher kommt es, dass die Polarisation allmählich fast vollständig von selbst verschwindet, wenn das Element längere Zeit hindurch stromlos bleibt.

Auf die Wirkung der Polarisation und die Hilfsmittel, die zur Beseitigung derselben in einzelnen Elementen angewendet werden, kommen wir ausführlicher zurück, wenn wir im letzten Kapitel der II. Hauptabteilung die galvanischen Elemente als Stromerzeuger behandeln.

9. Elektrolyse von Lösungen verschiedener Metalle.

Es giebt für jede Verbindung oder Gruppe von Verbindungen ein bestimmtes Minimum der E M K, bei der die Elektrolyse erst ordentlich beginnt, während bei geringeren Potentialdifferenzen an den Elektroden kaum merkliche Quantitäten ausgeschieden werden. Man nennt diese charakteristische Spannung den Zersetzungspunkt der betreffenden Verbindung.

An der Elektrode werden zuerst stets diejenigen Ionen ausgeschieden, zu deren Ausscheidung die geringste Arbeitsleistung erforderlich ist.

Auf diese Weise ist es geglückt, durch stufenweise Verstärkung der E M K aus einem Gemisch von Metallsalzen die verschiedenen Metalle nacheinander quantitativ auszuscheiden.

Es eignen sich für solche fraktionierte Elektrolysen sowohl die neutralen, als die sauren Salze, besonders aber die Doppelverbindungen mit oxalsaurem Ammoniak oder Cyankalium.

Hat man z. B. ein Gemisch von Silber-, Kupfer- und Zinksalzen in saurer Lösung, so scheidet sich zunächst bei Anwendung niedriger E M K nur Silber, bei Steigerung der E M K, wenn die Menge der Silberionen in der Lösung gering geworden ist, Kupfer aus. Bei noch weiterer Erhöhung der E M K scheidet sich dann Wasserstoff und bei noch grösserer Stromstärke das Zink aus.

Man macht neuerdings in der Elektrometallurgie von dieser Thatsache auch praktischen Gebrauch.

10. Über den Ursprung der galvanischen Elektrizität.

Lange Zeit war man sich im Unklaren über den Vorgang, der zur Entstehung der E M K in den Elementen Anlass giebt. — Nach den Untersuchungen von Nernst ist es sehr wahrscheinlich geworden, dass Auflösung der negativen Elektrode, z. B. des Zinks, und die dadurch veranlasste Elektrizitätsbewegung die Potentialdifferenz verursacht.

Wenn sich ein Metall in einer Flüssigkeit auflöst, sendet es positiv geladene Ionen in die Flüssigkeit, die ursprünglich unelektrische Metallplatte nimmt dadurch eine negative Ladung an. Die grössere oder geringere Fähigkeit des Elektrodenmetalles, Ionen auszusenden, wird Lösungstension genannt. Die Säure, in der die Lösung erfolgt, enthält aber infolge der Lösungsdissociation positiv geladene Wasserstoffionen, diese widersetzen sich dem Eintritte neuer, ebenfalls positiv geladener Metallionen. Die Auflösung erfolgt nur, wenn die positiven Wasserstoffionen durch kräftige Oxydations- oder Chlorierungsmittel, die leicht negativ geladene Sauerstoff- oder Chlorionen abgeben können, gebunden werden, oder wenn man durch eine negativ geladene zweite Elektrode dafür Sorge trägt, dass die positiv geladenen Wasserstoffionen sich entladen und in neutralem Zustande ausgeschieden werden können.

Chemisch reines Zink löst sich z. B. nur sehr langsam in verdünnten Säuren; berührt man aber das Zink mit einem in die Säure eintauchenden Platindraht, so geht die Auflösung des Zinks sehr rasch vor sich. Es tritt eine E M K auf, es fliesst ein Strom, und das Wasserstoffgas wird am Platin, nicht am Zink, ausgeschieden. Die Wasserstoffionen können sich am Zink nicht entladen, weil Zink eine starke Lösungstension hat, wohl aber am Platin, dessen Lösungstension gering ist.

Der entgegengesetzte Vorgang findet bei der Polarisation statt. Die positiv geladenen Wasserstoffionen sind an der Platte, die bei der Elektrolyse Anode war, in grosser Menge vorhanden, sie werden von dort abgestossen, durch den sogenannten osmotischen Druck in

der Flüssigkeit verbreitet, und entladen sich nunmehr an der Platte, die vorher Kathode war. Deshalb fliesst der Polarisationsstrom in entgegengesetzter Richtung, wie der polarisierende Strom.

Die Zuhilfenahme der Voraussetzung, dass in einer Lösung die elektrisch geladenen Ionen bereits vorhanden sind und die Vorstellungen von der Lösungstension und dem osmotischen Druck, gestatten die elektrischen Vorgänge in den Elementen, sowie die Erscheinungen der Polarisation und die Einflüsse der Konzentration, der Grösse der Elektrodenplatten, kurz, wie es scheint, alle bisher bekannten Erscheinungen in einfacher Weise zu verstehen.

Der Sitz der Potentialdifferenzen liegt an den Stellen, an welchen sich Elektrode und Elektrolyt berühren, wo Ionen einerseits in die Lösung eintreten, anderseits aus der Lösung in die Elektrode übertreten. Da jedes Teilchen des Ions eine ganz bestimmte elektrische Ladung besitzt, die es an der Elektrode entweder empfängt oder abgiebt, erklärt sich damit auch das Faraday'sche Gesetz.

11. Über den Ort der elektromotorischen Kraft im Volta-Elemente.

Bezüglich des Ortes, an welchem der Sitz der EMK eines galvanischen Elementes zu suchen ist, hat Ostwald[1]) auf einen bekannten Versuch verwiesen, den zuerst wohl Ritter (Anfang des vorigen Jahrhunderts) angestellt hat, und der von Lippmann eingehend untersucht und völlig aufgeklärt worden ist.

Wenn man in einer flachen Glasschale einen Quecksilbertropfen mit verdünnter Schwefelsäure bedeckt und etwas Kaliumchromatlösung zugiebt, so wird der runde Körper, entgegen der Wirkung der Oberflächenspannung, die dem Tropfen eine möglichst der Kugelgestalt sich nähernde Form zu geben sucht, merklich flacher. Bringt man nun durch die Säure einen zugespitzten Eisendraht mit dem Tropfen in Berührung, so zuckt der Tropfen zusammen. Dadurch wird die Berührung mit dem Eisendraht unterbrochen. Sofort beginnt sich der Tropfen infolge der zunehmenden elektrischen Ladung und abnehmenden Oberflächenspannung wieder auszudehnen, die Berührung wird von neuem herbeigeführt; sowie dies geschieht, zieht sich der Tropfen wieder zusammen u. s. f. Es entstehen auf diese Weise regelmässige Pulsationen des Quecksilbertropfens.

Die Ursache dieser Erscheinung steht mit der Frage nach dem Sitze der EMK in der galvanischen Zelle in innigem Zusammenhange. Das Quecksilber und die elektrolytische Flüssigkeit haben

[1]) Ostwald, Zeitschrift f. Elektrochemie, Bd. II, 1895, Heft 7, S. 129.

verschieden grosse elektrische Potentiale; infolgedessen findet an der Grenzfläche beider eine Anhäufung verschiedener Elektrizitäten statt; es bildet sich eine elektrische Doppelschicht, wie auf den beiden Platten eines Kondensators. Da die eine Kondensatorplatte, das Quecksilber, imstande ist, seine Oberfläche zu ändern, so wird durch die elektrostatische Ladung der Quecksilbertropfen sich ausdehnen; der Tropfen wird grösser und gleichzeitig dünner werden. Gleichgewicht tritt ein, wenn Oberflächenspannung und elektrostatische Wirkung gleich gross geworden sind.

Schalten wir eine veränderliche E M K ein, durch die wir dem Quecksilbertropfen ein anderes Potential geben, so ändert sich die Oberfläche des Tropfens stets derart, dass die veränderte Oberflächenspannung der veränderten E M K das Gleichgewicht hält. Machen wir das Quecksilber z. B. nach und nach mehr und mehr negativ, so verkleinert sich zunächst die Oberfläche. Das Quecksilber war somit anfänglich positiv gewesen. Die kleinste Oberfläche wird erreicht, die Oberflächenspannung erreicht ihren höchsten Wert, wenn man etwa ein Volt dazwischen geschaltet hat. Vergrössern wir die negative E M K noch mehr, so wird die Oberflächenspannung wieder kleiner, der Tropfen vergrössert sich aufs Neue. Bei einem Potential von 1 Volt war somit die Kondensatorladung Null geworden und trat bei höherem Potential in entgegengesetztem Sinne wirkend auf, eine abermalige Abnahme der Oberflächenspannung bewerkstelligend. Wir haben in diesem Falle einen einzelnen Potentialunterschied zwischen einem Metall (Quecksilber) und einer Flüssigkeit vor uns, und finden seine Grösse nahezu gleich 1 Volt in dem Sinne, dass das Quecksilber gegen verdünnte Schwefelsäure positiv ist. Hierdurch ist experimentell nachgewiesen, dass der Sitz der E M K des Volta-Elementes an der Grenzfläche zwischen Metall und Flüssigkeit liegt. Wenn zwischen verschiedenen Metallen, die sich berühren, wirklich Potentialunterschiede bestehen, so kommen sie ihrer Grösse nach gegen die Potentialdifferenzen, die zwischen Metallen und Flüssigkeiten auftreten, praktisch kaum in Betracht.

Die bei dem sogenannten ersten Voltaschen Fundamentalversuche auftretenden entgegengesetzten Ladungen verschiedener Metalle, die entstehen, wenn man z. B. einen Kondensator aus einer Zink- und einer Kupferplatte bildet, sind darauf zurückzuführen, dass die ausserordentlich dünne Gas- und Wasserdampfschicht, welche die beiden aufeinander gelegten Platten trennt, sich thatsächlich wie ein schlecht leitender Elektrolyt verhält.

V. Kapitel.

Magnetische Erscheinungen.

Die elektrischen Vorgänge stehen mit magnetischen Erscheinungen in innigem Zusammenhang und steter Wechselwirkung. Es erscheint daher zweckmässig, einer Darstellung der elektromagnetischen Vorgänge eine kurze Betrachtung über den Magnetismus vorauszusenden.

1. Begriff eines Magneten.

Unter einem Magneten versteht man einen Stahl- oder Eisenstab, der die Eigenschaft besitzt, an gewissen Stellen Eisenfeilspäne anzuziehen und festzuhalten. Diejenige Gegend, in welcher vorzugsweise die in die nächste Nähe des Stabes gebrachten Eisenfeilspäne sich dicht anlegen, nennt man die Pole eines Magnetstabes. Jeder solche Stab besitzt aber auch eine Stelle, an welcher wenig oder gar keine Eisenfeilspäne haften bleiben, und diese Gegend nennt man die neutrale Zone des Magneten. Für gewöhnlich besitzt ein Magnet nur zwei Pole, welche in geringer Entfernung von den Enden des Stabes liegen. In der Nähe der Mitte des Stabes liegt alsdann die neutrale Zone.

Die nebenstehende Fig. 41 zeigt einen kleinen Magnetstab, der in Eisenfeilspäne eingetaucht worden ist. Man erkennt leicht, dass diese sogenannten Pole nicht bestimmt angebbare Punkte sind, sondern Stellen von merklicher Ausdehnung. Bei sehr dünnen und im Verhältnis zu ihrer Dicke sehr langen Magnetstäben ist diese Gegend der Pole schärfer begrenzt.



Fig. 41.
Magnetstab mit Eisenfeilspänen.

Bei langen Magnetstäben tritt jedoch nicht selten auch der Fall ein, dass mehrere Pole vorhanden sind. Je einer liegt alsdann immer nahe jedem Ende des Stabes; durch je eine neutrale Zone voneinander getrennt, können jedoch auch noch mehr Pole vorhanden sein, und diese nennt man alsdann Folgepole oder auch Folgepunkte.

Wenn man einen einfachen Magnet, d. h. einen solchen, welcher nur zwei nahe den Enden befindliche Pole besitzt, in seinem Schwerpunkte vollständig frei beweglich aufhängt (Fig. 42), so richtet sich das eine Ende des Magneten nahezu nach Norden mit einer kleinen Abweichung von ungefähr 10° nach Westen, und dieses Nordende senkt sich nach unten, sodass die Achse der Nadel mit der horizontalen Richtung ungefähr einen Winkel von 67° einschliesst. Die Ursache dieser Erscheinung liegt darin, dass unsere Erde selbst ein Magnet ist, und wir uns dem in der Nähe des Nordpoles gelegenen Magnetpol unserer Erde näher befinden, als dem in der Nähe des geographischen Südpoles gelegenen Magnetpole derselben. In anderen Gegenden ist daher die Abweichung der Magnetnadel von der Nord-Südrichtung und die Neigung der Magnetnadel gegen die Horizontale eine andere, als bei uns.



Fig. 42. Freischwebende Inklinationsnadel.

Für gewöhnlich verwendet man unter dem Namen Kompass oder Bussole eine um eine vertikale Achse drehbare, horizontal schwebende Magnetnadel. Das ungefähr in die Gegend des geographischen Nordpoles hinweisende Ende einer Magnetnadel nennt man das Nordende, und den in der Nähe dieses Endes gelegenen Pol den Nordpol.[1])

2. Abstossende und anziehende Wirkung der Magnete.

Bringt man den Nordpol eines Magneten in die Nähe des Nordpoles einer anderen beweglichen Magnetnadel, so findet eine Abstossung statt. Nähert man jedoch dem Nordende des beweglichen Magneten den Südpol eines anderen Magneten, so bemerkt man eine Anziehung. Ebenso nimmt man wahr, dass der Südpol eines beweglichen Magneten von dem Südpole eines anderen abgestossen und von dem Nordpole angezogen wird. Man fasst diese Thatsache gemeiniglich in dem Satze zusammen: Gleichnamige Magnetpole stossen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an.

Die beiden Pole eines Magneten, die durch eine zwischen ihnen liegende neutrale Zone voneinander getrennt werden, sind immer entgegengesetzte Pole. Bei einem regelrecht hergestellten Magnetstabe, dessen neutrale Zone genau in der Mitte liegt, sind diese beiden Pole stets gleich stark, d. h. in gleicher Entfernung von

[1]) Die Franzosen und Engländer nennen vielfach das nach Norden weisende Ende den Südpol.

denselben bemerkt man gleich starke magnetische Anziehungen oder Abstossungen.

Wie alle in die Ferne wirkenden Kräfte, nehmen die magnetischen Abstossungen und Anziehungen umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung ab.

Um auf dem Wege der Rechnung die magnetischen Vorgänge angenähert nach Mass und Zahl darstellen zu können, denkt man sich die gesamte magnetische Kraft eines Magneten von zwei Punkten ausgehend, in welchen man sich gleiche Mengen von Nordmagnetismus in dem einen, von Südmagnetismus in dem anderen vereinigt denkt. Diese beiden Punkte nennt man dann die Magnetpole, die Verbindungslinie derselben die Achse und den Abstand der beiden Punkte die Länge des Magneten.

Durch Versuche, die man mit verhältnismässig langen und dünnen Magneten angestellt hat, ist gefunden worden, dass die Stärke der Anziehung oder Abstossung, welche zwei Magnetpole aufeinander ausüben, durch die Formel dargestellt werden kann (Coulomb'sches Gesetz)

$$f = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

wenn f die Grösse der anziehend oder abstossend wirkenden Kraft und m_1 und m_2 die Mengen von Magnetismus bedeuten, welche man sich in zwei Punkten vereinigt denkt, die sich in einer Entfernung r voneinander befinden. Besitzen die Grössen m_1 und m_2 gleiches Vorzeichen, d. h. sind beide gleichnamige Magnetismen, beide Nordmagnetismen oder beide Südmagnetismen, so ist das Produkt positiv, d. h. die Kraft f ist eine abstossende; sie wirkt auf Vergrösserung des Abstandes r der beiden magnetischen Punkte hin.

Sind dagegen die beiden Magnetismen ungleichnamige, d. h. denkt man sich in dem einen Punkte eine Menge Nordmagnetismus von der Grösse $+m_1$, in dem anderen eine gewisse Menge Südmagnetismus von der Grösse $-m_2$ vereinigt, so wirkt die Kraft f auf eine Verringerung des Abstandes r der beiden Punkte hin; das Produkt der beiden Grössen m_1 und m_2, die in diesem Falle entgegengesetzte Vorzeichen besitzen, ist negativ.

Das Produkt aus Polstärke m und dem Polabstande l eines Magneten, also die Grösse

$$m \cdot l = \mathfrak{M} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

wird das magnetische Moment des Stabes genannt.

3. Das Feld eines Magnetpoles.

Der ganze Raum, in welchem die Wirkung eines Magnetpoles wahrnehmbar ist, wird das magnetische Feld dieses Poles genannt.

4. Magnetische Kraftlinien.

Bringen wir einen anderen Magnetpol in ein solches Feld, so erfährt er innerhalb desselben eine Abstossung oder Anziehung, je nachdem er dem ersten gleichnamig oder entgegengesetzt ist. Die Bahn, in welcher sich dieser zweite Pol bewegen würde, wenn er frei beweglich und ohne Masse wäre, und keinerlei Kräfte anderer Art auf ihn einwirkten, heisst eine **Kraftlinie**. Eine magnetische Kraftlinie besitzt daher die Eigenschaft, dass die an sie in irgend einem Punkte gelegte Tangente die Richtung der magnetischen Kraft in diesem Punkte angiebt.

Bringt man an irgend eine Stelle eines magnetischen Feldes eine genügend kleine, frei bewegliche Magnetnadel, so stellt sich diese Nadel stets in die Richtung der Kraftlinie ein.

Bringt man in die Nähe eines Magnetpoles Eisenfeilspäne, die man auf eine nicht ganz glatte Fläche, z. B. rauhes Papier, aufgestreut hat, so werden diese einzelnen kleinen Späne zu kleinen Magneten und ordnen sich in der Richtung der Kraftlinien an. Man kann daher durch ein solches Verfahren den Verlauf der Kraftlinien in der Nähe eines Poles sichtbar machen. Die Abbildung 43 zeigt die Anordnung der Eisenfeilspäne auf einem Kartenblatte, welches in horizontaler Lage auf das Ende eines vertikal stehenden Magnetstabes aufgelegt worden ist. Die folgende Fig. 44 entsteht, wenn man das Blatt auf einen horizontal gelegten Magneten aufbringt und unter mässigem Rütteln fein verteilte Eisenfeilspäne aufstreut.



Fig. 43. Kraftlinien am Ende eines Magnetstabes.

Die Kraft, mit welcher an irgend einer Stelle im Raume ein Magnetpol auf einen anderen, der die Polstärke 1 besitzt, anziehend oder abstossend wirkt, nennt man die Intensität des Magnetfeldes an dieser Stelle. Wir wollen die Grösse dieser Kraft mit $\mathfrak{H}$ bezeichnen. Bringt man jetzt an dieselbe Stelle, an welcher sich vorher ein Magnetpol von der Polstärke 1 befunden hat, einen Magnetpol von der Stärke M, so ist nunmehr die Grösse der anziehend oder abstossend wirkenden Kraft gleich $M \cdot \mathfrak{H}$.

Da wir in der Physik durchgängig als Einheit der Masse das Gramm, als Längeneinheit das Centimeter und als Zeiteinheit die Sekunde verwenden, so müssen wir auch die vorher erwähnte Einheit des Magnetpoles auf dieses Centimeter-Gramm-Sekunden-System beziehen. Setzen wir nun in der Formel

$$f = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$m_1 = 1$, $m_2 = 1$ und $r = 1$ *cm*, so wird auch $f = 1$, d. h. zwei Magnetpole von der Polstärke 1, die sich in einem Abstande von 1 *cm* befinden, üben aufeinander eine abstossende oder anziehende

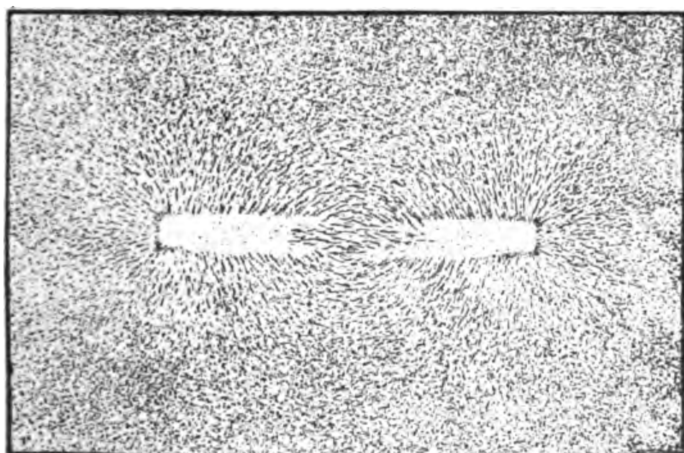


Fig. 44. Kraftlinien neben einem Magnetstabe.

Kraft aus, die so gross ist, dass dadurch einer Masse von 1 *g* in einer Sekunde eine Beschleunigung von 1 *cm* erteilt werden würde. Eine Kraft von diesem Betrage heisst 1 Dyne. Damit ist die Definition der Polstärke 1 gewonnen. Ein Magnetpol besitzt die Stärke 1, wenn er einen anderen in der Entfernung von 1 *cm* befindlichen Pol von gleicher Stärke mit einer Kraft von der Grösse 1 Dyne anzieht oder abstösst, je nachdem er ungleichnamig oder gleichnamig ist.

Die stärksten magnetischen Felder, welche wir bisher zu erzeugen imstande gewesen sind, erreichen ungefähr 30000 absolute Einheiten; d. h. in einem solchen Felde würde ein Pol von der Stärke 1 eine Anziehung oder Abstossung von 30000 Dynen oder von ungefähr 3 *kg* erfahren. (Vergl. Kap. II, Abschn. 4, S. 36.)



5. Die Zahl der magnetischen Kraftlinien, als Mass der Stärke eines Magnetfeldes.

Um einen Magnetpol von der Stärke 1 denken wir uns nun mit einem Radius von 1 *cm* eine Kugelfläche gelegt und denken uns aus dieser Kugelfläche ein Stück von 1 *qcm* Fläche herausgeschnitten. Die durch dieses Flächenstück hindurchgehende Anzahl von Kraftlinien benutzen wir als Mass für die Anzahl der Kraftlinien und nennen ein anderes Magnetfeld ein n fach stärkeres, wenn in diesem durch eine auf der Richtung der Kraftlinien senkrechte Fläche von 1 *qcm* n mal so viel Kraftlinien gehen, als durch das 1 *qcm* einer Kugelfläche, welche mit dem Radius 1 um einen Magnetpol von der Stärke 1 gezogen worden war. Man erhält auf diese Weise die Intensität eines magnetischen Feldes dargestellt durch eine Zahl, und nennt diese Zahl die Kraftlinienzahl. In einem durchaus gleichförmigen Magnetfelde wird die Kraftlinienzahl an allen Stellen dieselbe sein; die Kraftlinien würden in demselben alle gleichweit voneinander abstehen und untereinander parallel sein. Solche homogene Felder können aber nur selten erzeugt werden.[1])

In Wirklichkeit kommt nun ein einzelner Magnetpol niemals vor, sondern immer haben wir es mit mehreren, zumeist zwei entgegengesetzten Polen zu thun, und diese Pole eines Magnetstabes sind in Wirklichkeit nicht einmal bestimmte Punkte in der Nähe der Enden eines Magnetstabes, sondern es sind Räume von merklicher Ausdehnung.

6. Faraday's Vorstellung von den Kraftlinien.

Der berühmte englische Physiker Faraday hat daher die Abstraktion, welche in dem Begriff Magnetpol enthalten ist, fallen gelassen und hat nur den Begriff der Kraftlinie festgehalten und diesen benutzt, um die verschiedenen magnetischen Erscheinungen anschaulich zu beschreiben und miteinander in Zusammenhang zu bringen.

Den Verlauf der Kraftlinien in der Umgebung eines kleinen Magnetstabes und im Stabe selbst, zeigt Fig. 45. Der im Innern des Eisens verlaufende Teil der Kraftlinien heisst Magnetisierungslinien.

---

[1]) Ein magnetisches Feld kann auch durch eine von einem elektrischen Strome durchflossene Drahtspirale (Solenoid genannt) erzeugt werden. Wird diese Spirale so gewickelt, dass ihr Durchmesser überall gleich und die Zahl der Windungen auf gleiche Länge durchgehend dieselbe ist, so entsteht im Innern einer recht langen Spule ein fast völlig homogenes Feld, dessen Kraftlinien der Achse der Spule parallel verlaufen.

Um das Wesen dieser Kraftlinien verständlich zu machen, vergleicht er dieselben mit elastischen Bändern, die durch eine bestimmte Ursache, die magnetisierende Kraft, ausgedehnt werden, sodass sie eine bestimmte Fläche umspannen. Verschwindet die magnetisierende Kraft, so schrumpfen die Kraftlinien zu einem unwirksamen Punkte zusammen; in dem Masse, als die magnetisierende Kraft wächst, dehnen sich die Kraftlinien aus, sodass sie hiernach eine immer grössere Fläche umspannen.

Neue Kraftlinien drängen dann, den von den erweiterten Kraftlinien frei werdenden Raum einnehmend, von innen nach.

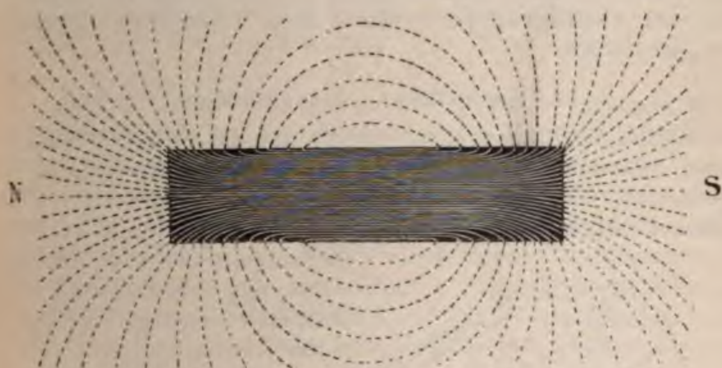


Fig. 45. Verlauf der Kraftlinien in und um einen Magnetstab.

Die Kraftlinien sind hiernach in sich selbst zurücklaufende oder geschlossene Kurven. Die Kraftlinien schneiden sich nicht, sondern umhüllen eine die andere.

7. Die Unterscheidung der Richtungen der Kraftlinien.

In einer Kraftlinie nennt man diejenige Richtung die positive, in welcher ein frei bewegliches, nordmagnetisches Teilchen ohne Masse sich bewegen würde. Bei einem Magnetstab treten somit am Nordende die positiv gerichteten Kraftlinien aus, am Südende des Magneten ein.

8. Die Kraftlinien stossen sich ab. Paramagnetische und diamagnetische Substanzen.

Gleich gerichtete Kraftlinien stossen einander ab, entgegengesetzt gerichtete Kraftlinien ziehen sich an und suchen sich zu vereinigen. Die gegenseitige Abstossung gleichgerichteter Kraftlinien ist in verschiedenen Substanzen sehr verschieden. Die Abstossung

ist am geringsten in reinem, ganz weichem Eisen; sie ist schon wesentlich grösser in weichem Stahlguss und Gusseisen; noch höhere Werte besitzt sie in hartem Gusseisen und gehärtetem Stahl; noch stärker stossen sich die Kraftlinien ab in den dem Eisen in chemischer Beziehung nahestehenden Metallen Kobalt und Nickel; noch erheblich grösseren Wert besitzt diese abstossende Kraft in Luft und im Vakuum. Es giebt jedoch auch Körper, in welchen sich die gleich gerichteten Kraftlinien noch stärker abstossen, als im Vakuum; zu diesen gehören z. B.: Kupfer, Schwefel, Wismut. Die Substanzen, in welchen die Abstossung zwischen den Kraftlinien geringer ist, als im luftleeren Raume, nennt man paramagnetische, und diejenigen, in welchen diese Abstossung grösser ist, diamagnetische.

9. Kraftröhren. Einheitsröhren.

Auch die Kraftlinien sind, ebenso wie die vorher mehrfach erwähnten einzelnen Magnetpole, nur Gedankendinge, nur Hilfsvorstellungen, die dazu dienen sollen, das Wesentliche der magnetischen Erscheinungen in einfacher Form beschreiben zu können. Das magnetische Feld dagegen ist etwas, das immer in und um den Magneten herum wirklich vorhanden ist.

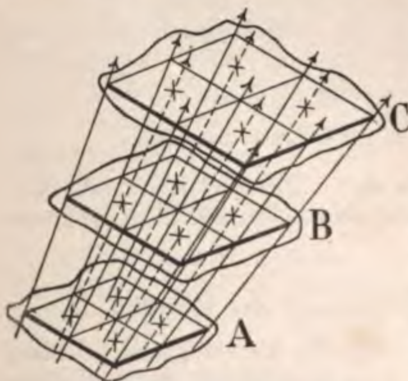


Fig. 46. Magnetische Kraftröhren.

Denken wir uns eine Schar von Flächen, A, B, C gezeichnet, welche überall auf den Kraftlinien des Feldes rechtwinklig stehen, so nennen wir diese Flächen Niveauflächen oder Flächen gleichen magnetischen Potentials. Eine Schar von Kraftlinien, welche einen röhrenförmigen Raum ausfüllt, heisst Kraft- oder Induktionsröhre. Jede solche Kraftröhre schneidet aus den Niveauflächen ein geschlossenes Flächenstück heraus. Die Fig. 46 zeigt z. B. eine solche Kraftröhre, welche aus den ebenfalls mit dargestellten Niveauflächen A B C krummlinig begrenzte Vierecke herausschneidet. Ist die durch die Mitte jeder Einheitsröhre laufende Kraftlinie, welche gewissermassen das ganze Bündel von Kraftlinien, aus welchen eigentlich die Röhre besteht, in sich verdichtet, eine Einheitslinie, so zerfällt jede Kraftröhre in eine Anzahl solcher Einheitsröhren. Den Begriff dieser Einheitslinie haben wir vorhin dahin definiert,

dass durch eine Kugelfläche, welche mit einem Radius von 1 *cm* Länge konstruiert worden ist, so viele Einheitslinien gehen, als die Kugelfläche Flächeneinheiten (4π) besitzt, wenn sich im Mittelpunkte dieser Kugel ein Magnetpol von der Polstärke 1 befindet.

10. Stärke des Magnetfeldes.

Ein Magnetfeld besitzt die Stärke oder Dichte $\mathfrak{H}$, wenn durch ein Flächenstück, welches senkrecht auf der Richtung der Kraftlinien steht und einen Inhalt von 1 *qcm* besitzt, $\mathfrak{H}$ solche Einheitslinien hindurch gehen. Auf einen Magnetpol von der Stärke 1 würde dieses Feld eine Kraft von $\mathfrak{H}$ Dynen ausüben. Auf einen Pol von der Stärke M würde dieses Feld eine Kraft von $M \cdot \mathfrak{H}$ Dynen ausüben.

Die gesamte Anzahl der Einheitslinien, welche in einem Magnetfelde vorhanden ist, wird gewöhnlich kurz mit dem Namen Feld bezeichnet und hierfür der Buchstabe Φ gebraucht.

Denken wir uns um einen Magnetpol von der Stärke 1 eine Kugel mit dem Radius von 1 *cm* konstruiert, so geht, wie bereits erwähnt wurde, durch jedes Flächenstück dieser Kugeloberfläche von 1 *qcm* Flächeninhalt eine Einheitslinie. Da die Oberfläche einer Kugel vom Radius R bekanntlich $4 \cdot \pi \cdot R^2$ Flächeneinheiten enthält und hier $R = 1$ ist, so ist das Feld, welches ein Einheitspol erzeugt

$$\Phi = 4\pi.$$

Denken wir uns ferner um einen Pol von der Stärke M eine Kugelfläche mit dem Radius 1 gelegt, so gehen durch jedes Flächenstück dieser Kugelfläche von 1 *qcm* Inhalt M Einheitslinien hindurch. Die Feldstärke eines Poles von der Stärke M beträgt somit:

$$\Phi = 4\pi M \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

Betrachten wir jetzt einen Magnetstab, bei welchem sich zwei gleich starke Magnetpole von der Stärke M, ein Nordpol und ein Südpol, im Abstande L voneinander befinden, so treten alle Kraftlinien bei dem Nordpole aus dem Stabe aus und bei dem Südpole wieder ein. Das Gesamtfeld des Magnetstabes ist daher genau wie vorher:

$$\Phi = 4\pi M.$$

Werden zusammengesetzte Magnetfelder dadurch erzeugt, dass mehrere Magnete in der Nähe eines Punktes vorhanden sind, so kann man die Feldstärken an jedem einzelnen Punkte nach dem Parallelogramm der Kräfte zusammensetzen. Die Feldstärke $\mathfrak{H}_1$ wird nach Grösse und Richtung auf eine von diesem Punkte ausgehende Gerade aufgetragen. Auf eine zweite Gerade, welche durch diesen Punkt hindurchgeht und die Richtung des zweiten Feldes besitzt, trägt man vom Punkte aus eine Strecke ab, deren Länge gleich $\mathfrak{H}_2$

ist (vergl. Fig. 47). Die Diagonale $\mathfrak{H}$ des aus den gegebenen beiden Seiten $\mathfrak{H}_1$ und $\mathfrak{H}_2$ konstruierten Parallelogrammes giebt nach Grösse

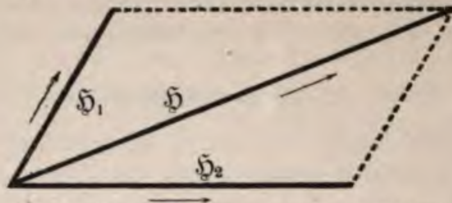


Fig. 47. Zusammensetzung von Magnetfeldern.

und Richtung die Feldstärke des aus der Zusammenwirkung der beiden einzelnen Felder sich ergebenden Gesamtfeldes.

11. Magnetisches Moment oder Stabmagnetismus.

Bringt man einen frei beweglichen Magnetstab in ein Magnetfeld, so wird dieser Stab sich in die Richtung der Kraftlinien einstellen. Besteht dieser Stab aus einem Nordpol und einem Südpol, beide von der Stärke M, so wird, wenn die Feldstärke des Magnetfeldes, in welchem sich der Stab befindet, $\mathfrak{H}$[1]) beträgt, der Nordpol mit einer Kraft von $M \cdot \mathfrak{H}$ in der Richtung der Kraftlinien fortgezogen und der Südpol in der den Kraftlinien entgegengesetzten Richtung. Da diese Kräfte gleich gross und entgegengesetzt gerichtet sind, so wird der Magnetstab in dem Felde keine fortschreitende Bewegung annehmen können.

Denken wir uns den Magnetstab in dem Felde senkrecht zur Richtung der Kraftlinien liegend, so wird der Nordpol in der Richtung der Kraftlinien mit der Kraft $M \cdot \mathfrak{H}$ fortgezogen; der Südpol wird mit der gleichen Kraft entgegengesetzt der Richtung der Kraftlinien fortgezogen. Es greifen somit an den beiden Polen des Magnetstabes zwei gleich grosse, parallele, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte an; diese bilden zusammen ein Kräftepaar, welches den Stab in die Richtungen der Kraftlinien zu drehen bestrebt ist. Das Drehungsmoment dieses Kräftepaares ist $\mathfrak{H} \cdot M \cdot l$, wenn l den Abstand der beiden Pole bedeutet.

Das Drehungsmoment $M \cdot l$, welches ein so gelegter Stab in einem Magnetfelde von der Feldstärke $\mathfrak{H} = 1$ erfahren würde, nennt man (wie schon S. 103 erwähnt wurde) das magnetische Moment oder den Stabmagnetismus des Magnetstabes. Wenn der Magnetstab

[1]) Es ist jetzt allgemein gebräuchlich geworden, für die magnetischen Grössen (magnetisches Feld, magnetische Induktion und Magnetisierungsintensität) deutsche Buchstaben zu gebrauchen, und nur die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus mit dem lateinischen Buchstaben H zu bezeichnen.

mit der Richtung der Kraftlinien einen Winkel α einschliesst, so ist das Drehungsmoment, welches der Stab erfährt, $\mathfrak{H} \cdot M \cdot l \cdot \sin \alpha$, weil nunmehr der senkrechte Abstand der drehend wirkenden Kräfte nicht mehr l, sondern nur noch $l \cdot \sin \alpha$ beträgt.

12. Schwingungen einer Magnetnadel in einem Magnetfelde.

Bringt man eine um ihren Schwerpunkt drehbare Magnetnadel in ein Magnetfeld und lenkt sie um einen Winkel aus der Richtung der Kraftlinien ab, so wird sie durch die Wirkung des Magnetfeldes in die Richtung der Kraftlinien gedreht. Da eine Magnetnadel aber körperliche Masse und somit auch Trägheit besitzt, so wird die Nadel wie ein Pendel um die Richtung der durch ihren Drehpunkt hindurchgehenden Kraftlinie hin- und herschwingen. Für diese Schwingungen gelten dieselben Gesetze, wie für Pendelschwingungen. Ist der Winkel, um welchen die Nadel aus ihrer Gleichgewichtslage abgelenkt worden ist, verhältnismässig klein, so beträgt die Dauer T einer Hin- und Rückschwingung:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\text{Trägheitsmoment der Nadel}}{\text{Grösstes Drehungsmoment der Nadel}}}.$$

Bezeichnen wir mit Ω das Trägheitsmoment der Magnetnadel, so ist hiernach:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\Omega}{\mathfrak{H} \cdot M \cdot l}}$$

Erfolgen in einer Minute (= 60 Sekunden) n solcher Schwingungen, so ist:

$$n \cdot T = 60,$$

und somit:

$$n = \frac{60}{T} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{\mathfrak{H} \cdot M \cdot l}{\Omega}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Lässt man eine und dieselbe Nadel in zwei verschiedenen Magnetfeldern schwingen, von welchen das eine die Feldstärke $\mathfrak{H}_1$, das andere die Feldstärke $\mathfrak{H}_2$ besitzt, so ist die Schwingungszahl n_1 der Nadel im ersten Felde:

$$n_1 = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mathfrak{H}_1 \cdot M \cdot l}{\Omega}},$$

und die Schwingungszahl n_2 derselben Nadel im zweiten Felde:

$$n_2 = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mathfrak{H}_2 \cdot M \cdot l}{\Omega}}.$$

Dividiert man n_1 durch n_2 und hebt auf der rechten Seite der Gleichung die im Zähler und Nenner gleichzeitig auftretenden Grössen weg, so ergiebt sich:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{\mathfrak{H}_1}}{\sqrt{\mathfrak{H}_2}},$$

oder, wenn man diese Gleichung quadriert und in die Form einer Proportion bringt:

$$n_1^2 : n_2^2 = \mathfrak{H}_1 : \mathfrak{H}_2, \text{ oder } \mathfrak{H}_1 : \mathfrak{H}_2 = n_1^2 : n_2^2 \quad . \quad . \quad 5)$$

Die Felddichten sind proportional den Quadraten der Schwingungszahlen. Man kann somit aus den Schwingungszahlen einer Magnetnadel, die man in verschiedene Magnetfelder bringt, das Verhältnis der Stärke dieser Felder ermitteln.

Man hat früher dieses Verfahren häufig angewendet, um an verschiedenen Punkten der Erde die Stärke des vom Erdmagnetismus erzeugten Feldes oder die Intensität des Erdmagnetismus zu bestimmen.

13. Magnetische Induktion.

Bringt man ein Stück weiches Eisen in ein magnetisches Feld, so verdichten sich die Kraftlinien in diesem Stück Eisen, weil sie sich in demselben weniger stark abstossen, als in der umgebenden Luft (vergl. Fig. 45, S. 107); das Eisen wird dadurch selbst zu einem Magnet, an seinem Nordende treten Kraftlinien ein, an seinem Südende aus. Das chemisch reine Eisen und die Abkömmlinge des Eisens, der Stahl und das Gusseisen (mit Ausnahme des Manganstahles), werden in einem Magnetfelde kräftig magnetisiert. Auch verschiedene andere Körper, wie Kobalt, Nickel und fast alle Eisenverbindungen, zeigen ähnliche Eigenschaften, jedoch in beträchtlich geringerem Masse. Man bezeichnet die Thatsache, dass solche paramagnetische Körper im Magnetfelde selbst die Eigenschaften von Magneten annehmen, als magnetische Influenz oder *magnetische Induktion.*

Verlaufen in einem Eisenkörper die Magnetisierungslinien gerade und parallel und haben sie gleichen Abstand voneinander, so nennt man die Magnetisierung gleichförmig. Dieser Fall tritt sehr angenähert ein, wenn man ein Rotationsellipsoid mit erheblich langer Rotationsachse, oder einen sehr langen dünnen Stab aus Eisen in die Richtung der Kraftlinien in die Mitte eines sehr langen stromdurchflossenen Solenoides bringt. Die Gesamtzahl der Kraftlinien, welche alsdann durch die Flächeneinheit eines zur Kraftlinienrichtung senkrechten Querschnittes hindurchtritt, nennt man *magnetische Induktion* und bezeichnet sie mit $\mathfrak{B}$.

Die Anzahl Kraftlinien, welche im gesamten zur Kraftlinienrichtung normalen Querschnitt Q des gleichförmig magnetisierten

Eisenstabes vorhanden sind, wird **Induktionsfluss** genannt und mit dem Buchstaben Φ bezeichnet. Es ist also:

$$\mathfrak{B} \cdot Q = \Phi \text{ oder } \mathfrak{B} = \frac{\Phi}{Q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

14. Intensität der Magnetisierung oder spezifischer Magnetismus.

Die Grösse $\mathfrak{B}$, die Anzahl der Induktionslinien in einem zur Kraftlinienrichtung senkrechten Querschnitt eines Eisenstabes von 1 *qcm* Flächeninhalt setzt sich aus zwei Teilen zusammen, nämlich aus der Anzahl Kraftlinien $\mathfrak{H}$, die von dem magnetischen Felde herrühren, und der Anzahl χ der Kraftlinien, welche in dem Eisen verlaufen und durch das Einbringen des Eisenkörpers in das Feld neu entstanden sind. Es ist also $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + \chi$ . . . . 6)

Die Grösse χ kann auf folgende Weise bestimmt werden.

Von einem Magnetpol von der Stärke M treten (vergl. S. 109) 4πM Kraftlinien aus. Diese 4πM Kraftlinien sind also auch im Eisenkörper als Magnetisierungslinien enthalten. Nimmt man an, dass sie im Eisenkörper gleichförmig verteilt sind, so gehen durch die Einheit eines Querschnittes von der Grösse q alsdann $4\pi \cdot \frac{M}{q}$ Magnetisierungslinien hindurch. Multipliziert man in diesem Ausdrucke Nenner und Zähler des Bruches mit l, so erhält man $4\pi \cdot \frac{M\,l}{q\,l}$.

Der Zähler ist nach Gleichung 2) S. 103 das magnetische Moment $\mathfrak{M}$. Der Nenner ist aber das Volumen V des Eisenkörpers.[1])

Die Grösse $\frac{\mathfrak{M}}{V}$ wird mit $\mathfrak{J}$ bezeichnet und wird **Intensität der Magnetisierung** oder auch **spezifischer Magnetismus** genannt.

Man erhält somit: $\chi = 4\pi \cdot \mathfrak{J}$ . . . . 7)

und $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi \cdot \mathfrak{J}$ . . . . 8)

15. Magnetische Permeabilität und Suszeptibilität.

Setzt man nun weiter $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} \cdot \mu$ und $\mathfrak{J} = \mathfrak{H} \cdot \varkappa$, wo μ und $\varkappa$ zwei Zahlenfaktoren sind, so ist μ die **magnetische Permeabilität**

[1]) Bei einem unendlich langen Stabe liegen die Pole am Ende, dann ist also Polabstand und Stablänge identisch, somit l · q das Volumen des unendlich langen Stabes. — Beim Rotationsellipsoid ist der Polabstand $l = \frac{2}{3} \cdot 2a$, wenn mit a die Länge der grossen Halbachse der Ellipse bezeichnet wird. $\frac{4}{3}\, a \cdot q$ aber ist das Volumen des Ellipsoides.

oder die **magnetische Leitungsfähigkeit** und $\frac{1}{\mu}$ der **spezifische magnetische Widerstand** der betreffenden Eisensorte, und $\varkappa$ die **Suszeptibilität** (magnetische Aufnahmefähigkeit) oder der **Magnetisierungs-Koëffizient** des Materials.

Dividiert man die Gleichung 8) durch $\mathfrak{H}$, so erhält man:

$$\frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = 1 + 4\pi \cdot \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}},$$

oder nach Einführung der neuen Bezeichnungen:

$$\mu = 1 + 4\pi \cdot \varkappa \quad \quad 9)$$

Verschiedene Eisensorten zeigen sehr grosse Verschiedenheiten hinsichtlich der Durchlässigkeit für magnetische Kraftlinien; ein Mass für diese Durchlässigkeit ist die Permeabilität μ. Bestimmt man statt $\mathfrak{B}$ die Intensität der Magnetisierung $\mathfrak{J}$, so ist $\frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}} = \varkappa$ ein Mass für die Aufnahmefähigkeit des Materiales.

Diese Grössen lassen sich, wie wir später in dem Abschnitt über Messmethoden zeigen werden, auf dem Wege des Versuches zahlenmässig bestimmen. Es ist nun eine bekannte Erfahrungsthatsache, dass mit zunehmender Stärke der magnetisierenden Wirkung der erzeugte Magnetismus nicht gleichmässig wächst.

Die Magnetisierung erreicht vielmehr bei wachsenden magnetisierenden Kräften ein Maximum, sodass schliesslich $\mathfrak{J} = \mathfrak{H} \cdot \varkappa$ eine konstante Grösse wird.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Zahl $\varkappa$ und somit auch die von ihr abhängende Zahl μ keine Konstanten sind. Mit zunehmender Stärke des magnetischen Feldes $\mathfrak{H}$ wächst $\varkappa$ und μ; beide erreichen schliesslich einen Höchstwert und nehmen hierauf wieder ab, sodass $\mathfrak{J} = \mathfrak{H} \cdot \varkappa$ eine Konstante, die Grösse $\varkappa$ also $\mathfrak{H}$ umgekehrt proportional wird. Dieser Zustand entspricht der **magnetischen Sättigung** des Eisens.

Von ganz bedeutendem Einflusse haben sich Erschütterungen gezeigt; die Suszeptibilität nimmt ganz ausserordentlich zu, wenn das Eisen während der Magnetisierung erschüttert wird.[1])

16. Die Magnetisierungskurven.

Um eine Vorstellung von dem Verlaufe der Grössen $\mathfrak{B}$ und μ zu geben, teilen wir in nachstehender Tabelle für wachsende Feld-

[1]) Durch Erschüttern während des Magnetisierens ist es gelungen, μ bis über 20000 zu steigern.

stärken $\mathfrak{H}$ einige Zahlenwerte nach den Experimentaluntersuchungen von **Ewing**, von **Hopkinson** und der **Physikalisch-Technischen Reichsanstalt** in Charlottenburg mit.

Schwedisches Holzkohleneisen			Weicher Eisendraht			Gusseisen		
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$
0,67	420	630	0	0	—	0	0	—
1,29	3360	2610	0,32	41	128	0,07	3	43
1,90	6550	3450	0,85	165	194	0,20	12	60
2,70	8640	3200	1,38	413	299	0,38	24	63
5,63	12110	2150	2,18	1460	670	0,73	48	66
9,61	13540	1410	2,80	3680	1310	1,13	76	67
14,9	14260	960	3,50	7230	2070	1,87	145	77
25,1	14940	600	4,21	9880	2350	3,27	344	105
36,3	15380	420						
45,9	15670	340						
64,5	16130	250						
90,6	16650	180						
139,8	17450	130						
140,2	17450	129						
Krupp'scher Dynamo-Stahlfaçonguss								
1,04	1140	1090	4,92	11540	2350	5,54	864	156
1,51	2970	1970	5,63	12570	2230	7,34	1490	203
2,11	5290	2510	6,69	13520	2020	9,94	2360	237
2,89	7200	2490	8,46	14390	1700	13,15	3170	241
4,45	9600	2160	10,23	14840	1450	15,75	3680	234
7,65	11960	1560	12,11	15090	1250			
11,9	13370	1130	15,61	15420	990	3900	19660	5,04
17,8	14390	810	20,32	15630	770	6400	21930	3,42
29,1	15290	530	22,27	15710	705	8080	23520	2,91
47,5	16060	340				9120	24630	2,70
66,1	16570	250	100	16600	166	11770	27680	2,35
98,9	17270	180	200	17800	89	13460	28710	2,13
146,0	18050	120	240	18200	76	14690	30160	2,05
146,1	18070	120				16200	30920	1,91
			1490	22650	15,20	16900	31760	1,88
			3600	24650	6,85			
			6070	27130	4,47			
			8600	30270	3,52			
			18310	38960	2,13			
			19880	41410	2,07			

Die Fig. 48 stellt graphisch (nach Ewing) die Änderung der Grösse $\mathfrak{B}$ (Ordinate) mit zunehmender Stärke des Magnetfeldes $\mathfrak{H}$ (Abscisse) für einige in der Elektrotechnik wichtige Eisensorten dar.

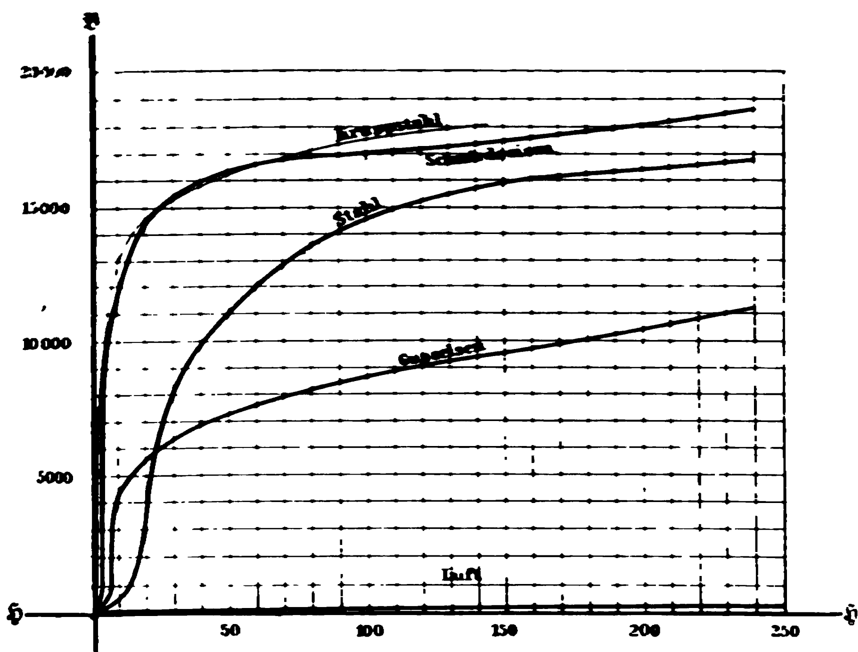


Fig. 48. Magnetisierungskurven einiger Materialien.

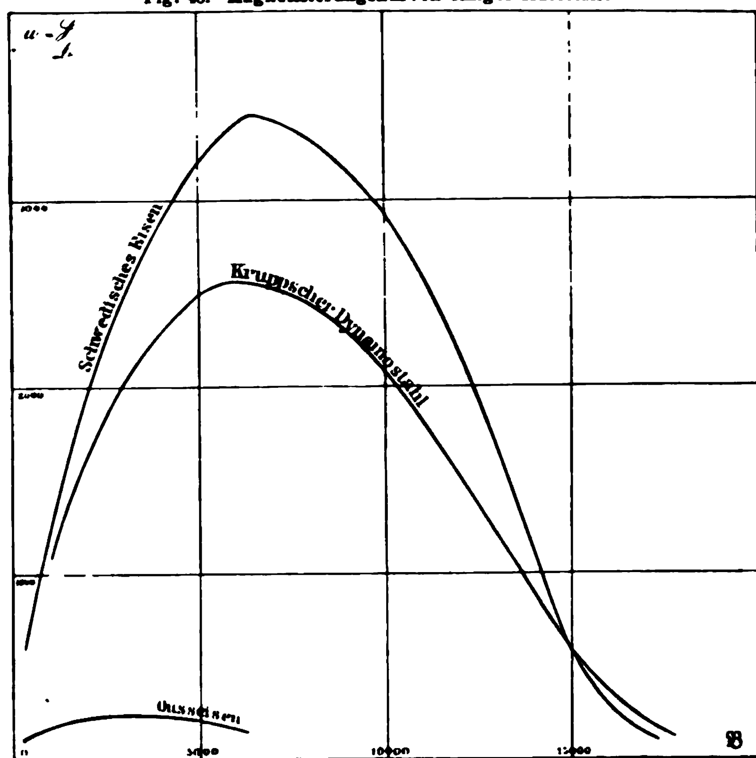


Fig. 49. Magnetische Permeabilität bei verschiedener magnetischer Induktion 𝔅.

Man erkennt sofort, dass weiches Eisen schon bei geringeren magnetisierenden Kräften eine grössere magnetische Induktion erreicht, als Gusseisen und Stahl selbst im Sättigungszustande anzunehmen imstande sind, und dass der Krupp'sche Dynamo-Stahlfaçonguss selbst Schmiedeeisen hinsichtlich der Magnetisierungsfähigkeit teilweise übertrifft. Man nennt diese Linien die Magnetisierungskurven der betreffenden Materialien.

Den Verlauf der Grösse μ für einige wichtige Materialien kann man aus dem Diagramm Fig. 49 ersehen.

Wenn man ein Stück Eisen, welches zunächst keinerlei magnetische Eigenschaften zeigt, einem Magnetfelde von wachsender Stärke aussetzt, so nimmt im Anfang bei ganz schwachen magnetisierenden Kräften die Magnetisierung des Stabes nur langsam zu. Bei wachsender magnetischer Kraft vergrössert sich die Magnetisierung alsdann rasch. Wenn das magnetische Feld jedoch noch weiter wächst, nimmt die Magnetisierung des Eisenstabes immer weniger zu und nähert sich mehr und mehr dem Sättigungszustande, der jedoch thatsächlich eigentlich erst in einem unendlich starken Magnetfelde erreicht wird.

17. Entmagnetisierende Kraft.

Die aus einem magnetisierten Rotationsellipsoid oder einem Stabe austretenden Kraftlinien üben, weil sie sich in der umgebenden Luft viel stärker abstossen, als im Eisen, eine störende Rückwirkung auf den Verlauf der biegsamen Magnetisierungslinien selbst im Eisen aus. Diese Wirkung ist aber der der magnetisierenden Kraft des Feldes, in welchem sich der eiserne Stab oder das Rotationsellipsoid befindet, entgegengesetzt gerichtet.

Man nennt diese schwächende Rückwirkung der Enden des Stabes oder Ellipsoides die entmagnetisierende Kraft der Enden.

Bei Rotationsellipsoiden lässt sich die entmagnetisierende Kraft berechnen,[1]) und gerade das ist ein Grund, weshalb man für absolute magnetische Messungen nach der Ablenkungsmethode vorzugsweise Rotationsellipsoide als Probekörper benutzt.

Der Betrag, um den sich das magnetische Feld verkleinert, ist der Magnetisierungsintensität $\mathfrak{J}$ proportional.

Bedeutet $\mathfrak{H}'$ die Stärke des ungestörten Feldes und $\mathfrak{H}$ die des thatsächlich wirksamen, so ist

$$\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N \cdot \mathfrak{J} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

und der Faktor N wird der Entmagnetisierungsfaktor genannt. Ist m das Verhältnis der grossen und kleinen Achsen beim Ellipsoid oder

[1]) Vergl. F. Neumann, Vorlesungen über die Theorie des Magnetismus, S. 74.

das Verhältnis aus Länge und Dicke bei einem langen Stabe, so haben die Entmagnetisierungsfaktoren[1]) etwa folgende Werte:

Entmagnetisierungsfaktoren N.

$m = \frac{a}{b}$	bei Ellipsoiden	bei Stäben
5	0,70	0,68
10	0,25	0,26
20	0,085	0,090
25	0,059	0,063
50	0,018	0,018
100	0,005	0,005
300	0,001	0,001

Man sieht, dass, wie zu erwarten war, die für Ellipsoide und die für Stäbe gefundenen Zahlen um so besser übereinstimmen, je grösser m, d. h. je länger die Körper im Vergleich zu ihrer Dicke sind, und dass für sehr lange Stäbe der entmagnetisierende Einfluss der Enden völlig vernachlässigt werden kann.

18. Der Einfluss vorhergehender Magnetisierungen. Hysteresis.

Bei einer Stärke des Feldes von ungefähr 150 Einheiten ist der Sättigungszustand bei ganz weichem Eisen nahezu erreicht; bei magnetisch härteren Materialien, wie z. B. Stahl, muss man die Feldstärke $\mathfrak{H}$ bis etwa 300 Einheiten anwachsen lassen, wenn man bis zur Sättigung magnetisieren will. Fig. 50 zeigt auf dem Kurvenstück OA nochmals den Verlauf der Magnetisierung, wie wir denselben schon in der vorhergehenden Figur gezeigt haben, wenn ein vorher unmagnetisches Stück Eisen zum ersten Male magnetisiert wird. Dieser Kurventeil OA wird häufig die jungfräuliche Kurve oder Nullkurve genannt. Als Abscissen sind die Feldstärken $\mathfrak{H}$, das sind die Zahlen der Kraftlinien für jedes Quadratcentimeter des magnetisierenden Feldes, und als Ordinaten die Zahl der im Innern des Stabes vorhandenen Kraftlinien, die wir vorher mit $\mathfrak{B}$ bezeichneten, aufgetragen.

Stellen wir uns nun vor, dass wir, nachdem der Punkt A der Kurve erreicht worden ist, die Feldstärke wieder abnehmen lassen, so bleibt der Stab stärker magnetisch, als er vorher bei gleicher magnetisierender Kraft $\mathfrak{H}$ gewesen ist. Der Stabmagnetismus nimmt alsdann längs des Kurvenstückes AC ab. Wenn die magnetisierende Kraft wieder den Wert Null angenommen hat, besitzt das Eisenstück noch einen remanenten Magnetismus OC. Diese Strecke OC, oder

[1]) Für Ellipsoide sind die Werte nach Neumanns Formel berechnet. Für kreiscylindrische Stäbe hat Charles Rigborg Mann die Zahlwerte experimentell bestimmt.

die ihr gleiche OC' wird gewöhnlich kurz die Remanenz genannt. Der Betrag der Remanenz und ihr Verhältnis zur maximalen Induktion kommt besonders für die Beurteilung von Dauermagneten in Betracht.

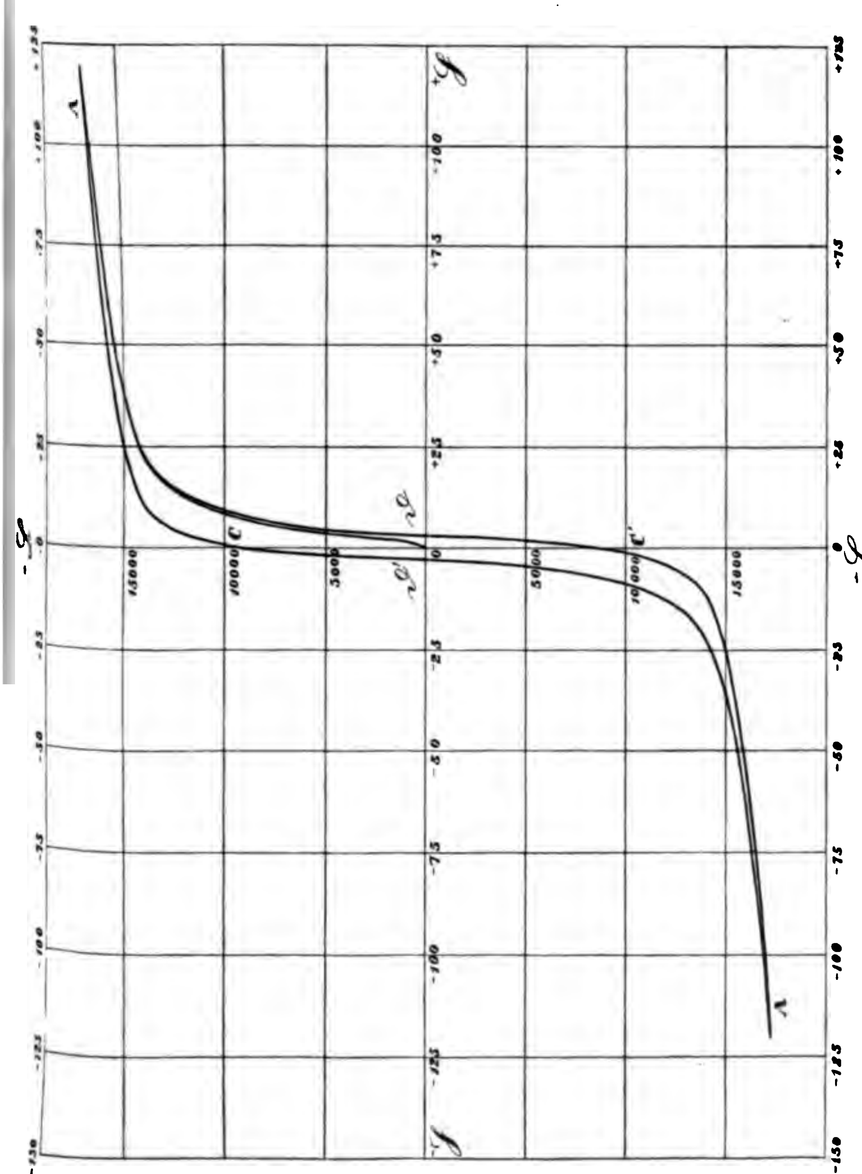


Fig. 50. Die Hysteresisschleife bei magnetisch weichem Material.

Erst wenn wir nunmehr ein entgegengesetzt gerichtetes magnetisches Feld von wachsender Stärke erzeugen, gelingt es, den Stab wieder unmagnetisch zu machen. Die Feldstärke OD, die nötig ist, um die in dem Stabe erzeugte magnetische Induktion wieder zu vernichten, ist ein Mass der Fähigkeit des Materiales magnetische Kraftlinien nach Aufhören der Magnetisierung zurück zu halten, und wird Koërzitivkraft genannt.

Verstärken wir nun weiter dieses entgegengesetzt magnetische Feld, so nimmt der Stab entgegengesetzten Magnetismus von rasch zunehmender Grösse an und erreicht für dieselben magnetisierenden Kräfte, wie vorher, aufs neue den Sättigungszustand. Lassen wir nunmehr das Feld von entgegengesetzter Richtung an Stärke wieder abnehmen, so sinkt der Stabmagnetismus im Anfang nur langsam und zeigt, wenn das Feld wieder die Stärke Null erhalten hat, nunmehr denselben negativen Wert OC′. Wird nun wiederum ein positives Feld erzeugt, so nimmt der negative Stabmagnetismus rasch ab und erreicht im Punkte D′ den Wert Null. Selbstverständlich ist OD′ = OD.

Bei weiter wachsendem positiven Felde wird der Stabmagnetismus positiv, um aufs Neue bei ungefähr 130 Einheiten den positiven Sättigungswert zu erreichen. Das Eisen hat nunmehr einen vollständigen magnetischen Kreisprozess durchlaufen und man kann diesen Prozess beliebig oft wiederholen, wenn man das magnetische Feld $\mathfrak{H}$ zwischen den Werten + 130 und — 130 periodisch sich ändern lässt.

Man erkennt aus der vorstehenden Figur, dass die Stärke der Magnetisierung, welche ein Stück weiches Eisen in einem Magnetfelde erfährt, nicht nur von den augenblicklich auf den Stab einwirkenden magnetischen Kräften abhängt, sondern auch von den magnetischen Zuständen, in welchen sich der Stab vorher befunden hat. Während die Stärke des magnetisierenden Feldes wächst, ist bei gleicher Feldstärke der Magnetismus des Stabes stets geringer, als wenn die magnetisierende Kraft abnimmt.

Die vier Kurvenstücke: AD, DA′, A′D′, D′A sind einander kongruent. Man zeichnet daher, wenn man für praktische Zwecke eine Eisensorte untersucht, nur die Linien OA, AD und D′A.

Die ganze Figur, die in Fig. 50 dargestellt wird, heisst die Hysteresisschleife. Man sagt von einem Stück Eisen, welches alle diese magnetischen Zustände durchlaufen hat, es sei einem magnetischen Kreisprozesse unterworfen worden.

Dieser Erscheinung, welche schon vor den Untersuchungen Ewing's von Warburg bemerkt worden war, hat ersterer den Namen Hysteresis (von ὑστερέω, ich bleibe zurück) gegeben. Bei den Ver-

suchen über diesen Gegenstand hat sich gezeigt, dass ein Stück Eisen auch nicht augenblicklich den Magnetismus annimmt, welcher der Stärke der magnetisierenden Kraft des Feldes entspricht, sondern dass dazu eine gewisse Zeit gehört; bei dicken Stäben vergeht sogar eine merkliche Zeit bis zur Erreichung des höchsten Wertes. Erschütterungen, welchen der Stab ausgesetzt wird, beschleunigen nicht nur den Eintritt des der magnetisierenden Kraft entsprechenden Magnetismus, sondern ermöglichen sogar die Erreichung wesentlich grösserer Werte. Aus weichem Eisen kann durch Erschütterungen der von einer vorhergehenden Magnetisierung zurückgebliebene remanente Magnetismus entfernt werden.

Alle diese Umstände deuten darauf hin, dass ein Eisenstab aus kleinsten Teilen (Molekeln) besteht, die selbst Magnete sind und für gewöhnlich im Stabe regellos durcheinander liegen. Durch die Einwirkung magnetisierender Kräfte werden diese kleinen Molekularmagnete mehr und mehr der Richtung der Kraftlinien des magnetisierenden Feldes parallel gestellt. Diese Molekularmagnete scheinen aber den Kräften, welche sie drehen, eine Art von Reibungswiderstand entgegenzusetzen, infolgedessen sie in einer einmal angenommenen Lage zu beharren streben. Um alle diese kleinen Molekularmagnete eines Stabes der Richtung der Kraftlinien parallel einzustellen und damit die magnetische Sättigung zu erreichen, bedarf es daher einer ziemlich starken magnetisierenden Kraft. Man kann die einmal in bestimmtem Sinne gerichteten Molekularmagnete nur durch Anwendung einer gewissen Kraft in das ursprünglich regellose Durcheinander, welches dem unmagnetischen Zustande entspricht, zurückbringen.

Die Grösse des von den beiden Kurven A'DC AD'C'A' eingeschlossenen Flächenstückes misst den Betrag der Arbeit, die aufgewendet werden muss, damit das Eisen den magnetischen Kreisprozess einmal vollständig durchläuft.

Der zur Überwindung dieses Reibungswiderstandes erforderliche Arbeitsaufwand, der Arbeitsverlust durch Hysteresis, zeigt sich im Eisen als Erwärmung desselben. Eine Eisenmasse, die oft hintereinander in entgegengesetztem Sinne magnetisiert wird, erwärmt sich infolge der Hysteresis.

Wenn man den Magnetismus nicht bis zur Sättignng treibt, sondern schon vorher die Magnetisierung wieder abnehmen und umkehren lässt, entstehen kleinere Hysteresisschleifen, die entsprechend auch kleinere Flächen umfassen, geringere Arbeitsaufwände erfordern. Fig. 51 zeigt z. B. magnetische Kreisprozesse, von welchen der eine sich bis $\mathfrak{B}_{max} = +16000$, die anderen nur bis $\mathfrak{B}_{max} = +10000$, $+6000$, $+2000$ erstrecken.

Als Abscissen sind jedoch nicht die Werte von $\mathfrak{H}$, sondern die ihnen proportionalen Zahlen der Ampèrewindungen[1]) für je 1 *cm* Länge des Eisenstückes benutzt.

Vielfach wird in der Technik nicht der Energieverlust bei einem vollständigen magnetischen Kreisprozess selbst zur Beurteilung der Qualität einer Eisensorte benutzt, sondern der sogenannte Steinmetz'sche Koëffizient.

Steinmetz hat nämlich gezeigt, dass der Flächeninhalt der Hysteresisschleife bei verschiedenen Werten der maximalen Induktion $\mathfrak{B}_{max}$ nahezu proportional der 1,6ten Potenz der angewendeten Maximalinduktion ist. Er setzt also den Arbeitsaufwand, den ein

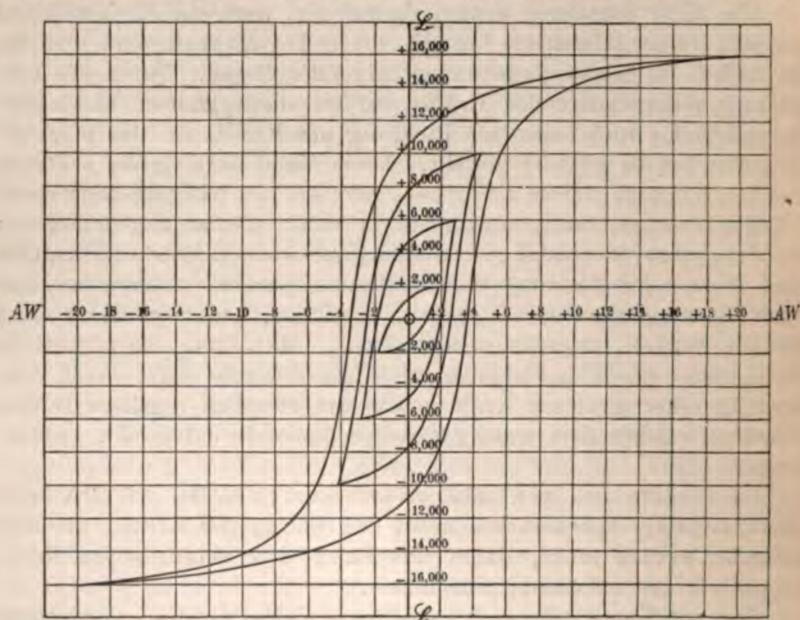


Fig. 51. Hysteresisschleife für verschieden grosse maximale magnetische Induktion.

vollständiger magnetischer Kreisprozess erfordert, den Inhalt des Flächenstückes AD A'D'A, den er ε nennt (gemessen in Watt für 1 *cbcm*):

$$\varepsilon = \eta \cdot \mathfrak{B}_{max}^{1,6}$$

Der Proportionalitätsfaktor η in dieser Formel ist der Steinmetz'sche Koëffizient.

Neuere Versuche der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt haben aber gezeigt, dass diese Steinmetz'sche Formel ziemlich un-

[1]) Wegen der Erklärung des Ausdruckes Ampèrewindungen vergleiche Kap. VI Abschn. 4, S. 129.

genau ist, und dass man den aus Versuchen ermittelten Wert von η nur in nächster Nähe derjenigen Werte von $\mathfrak{B}_{max}$ benutzen darf, bei welchen η ermittelt worden ist; sonst können Fehler bis zu 30 und 40% eintreten.

Man erhält die Grösse ε in absoluten Arbeitseinheiten, also in Ergs, wenn man $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ in absoluten elektromagnetischen Einheiten ausdrückt, und den mit diesen Grössen gefundenen Flächeninhalt der Hysteresisschleife durch 4π dividiert.

19. Die Permeabilität.

Um die Werte der Permeabilität μ zu ermitteln, benutzt man nicht einen der Äste der Hysteresisschleife, weil ja dann zu denselben Werten von $\mathfrak{H}$ verschiedene Werte von $\mathfrak{B}$ gehören würden, je nachdem man sich in einem aufsteigenden oder in einem absteigenden Zweige befindet, sondern man benutzt, vom unmagnetischen Zustande ausgehend, für diesen Zweck die Nullkurve (vergl. Abschn. 17, S. 118) oder die ihr sehr naheliegende Kommutierungskurve.

Um die Kommutierungskurve zu erhalten, geht man vom unmagnetischen Zustande aus und schreitet bis zu einem bestimmten Induktionswerte vor; ehe man jedoch beobachtet, wechselt man wiederholt die Feldrichtung und beobachtet erst hiernach; alsdann geht man erst zu einem anderen Induktionswert über, kommutiert wieder mehrere Male, beobachtet wieder, und schreitet auf diese Weise bis zur Sättigung fort.

Durch Abwärtsgehen auf der Kommutierungskurve kann man auch den unmagnetischen Anfangszustand wieder herstellen. Man schwächt, während das Eisenstück sich in einer magnetisierenden Spule befindet, unter andauerndem Umkehren der Stromrichtung die Stromstärke, bis man den Nullpunkt erreicht hat.

In Fig. 49 sind die Permeabilitätskurven einiger Eisensorten abgebildet, und zwar ist μ als Funktion von $\mathfrak{B}$ dargestellt.

Man ersieht, dass von Null ausgehend, die Permeabilität rasch steigt, dann bei einer Induktion von etwa 7000 einen Maximalwert erreicht. Dann sinkt μ rasch wieder und nähert sich mit fortschreitender Sättigung mehr und mehr einem sehr niedrigen konstanten Wert.

Man unterscheidet magnetisch weiche und magnetisch harte Materialien. Magnetisch weich nennt man eine Eisensorte, die leicht Magnetismus annimmt, also schon bei geringen Feldstärken ($\mathfrak{H} = 2{,}5$) hohe Werte der magnetischen Induktion (ungefähr $\mathfrak{B} = 4000$ Einheiten) erreicht, anderseits aber den magnetischen Zustand leicht wieder verliert.

Magnetisch hart sind Materialien, die sich schwer magnetisieren lassen, also erst bei hohen Werten der Feldstärke meist nur ein niedriges Maximum der Permeabilität (meist nicht mehr als 100 bis 300 C. G. S.-Einheiten) erlangen. Dafür zeigen diese Substanzen zumeist eine hohe Koërzitivkraft.

20. Magnetische Eigenschaften verschiedener Eisensorten.

Heutzutage interessieren den Elektrotechniker nur noch die sogenannten »magnetisch weichen« Materialien mit hoher Permeabilität und geringer Hysteresis. Neben dem Schmiedeeisen kommen Walzeisen, Flusseisen, Stahlguss, gegossener Siemens-Martinstahl und ähnliche Eisensorten in Betracht.

Obgleich ein gesetzmässiger Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und Permeabilität sich nicht sicher hat feststellen lassen, ist doch soviel ziemlich zuverlässig ermittelt worden, dass die Permeabilität im allgemeinen um so höher ist, je reiner das Eisen von fremden Beimengungen ist.

Ein für elektrische Apparate brauchbarer Stahlguss darf nach Parshall z. B. höchstens:

Kohlenstoff	0,25 %
Silicium	0,20 %
Schwefel	0,05 %
Phosphor	0,08 %
Mangan[1]	0,50 %

enthalten.

Den nachteiligsten Einfluss auf die Permeabilität einer Sorte Stahlguss scheint der Kohlenstoff zu haben, der im Stahlguss bekanntlich nur in gebundener Form und nicht als Graphit vorkommt. Silicium in geringen Beimengungen ist minder schädlich.

Auch durch mechanische Behandlung wird die Permeabilität erheblich herabgedrückt. Man kann diesen Einfluss jedoch fast vollständig beseitigen, wenn man das Eisen nach der Bearbeitung wiederholt, vollständig, lange ausglüht (mindestens bis 850° erhitzt) und ganz langsam abkühlen lässt.

Aus demselben Blocke geschnittene Proben und selbst verschiedene Stellen desselben Probestückes zeigen nicht selten hinsichtlich ihres magnetischen Verhaltens erhebliche Unterschiede, die wohl von der Bearbeitung herrühren.

Die mit der Hysteresis zusammenhängende Energievergeudung ist besonders bei Eisenblechen, wie solche für die Kerne der Trans-

[1] Andere nehmen als zulässigen Höchstgehalt an Mangan sogar nur 0,15 % an.

formatoren und für Bleche, die zum Aufbau der Anker der Dynamomaschinen dienen, von hoher Bedeutung. Bei schwedischem Walzeisen beträgt die Energievergeudung bei einer Maximalinduktion $B_{max} = 18000$ etwa 6000 bis 8000 Erg für 1 *cbcm* und für Kruppschen Stahlguss etwa 12000 Erg unter gleichen Verhältnissen. In den meisten Fällen ist die Energievergeudung um so kleiner, je grösser die Permeabilität der Eisensorte ist; es kommen jedoch auch vereinzelte Abweichungen von dieser Regel vor.

Durch längere Verwendung in den Transformatoren und Ankern wächst mit der Zeit die Vergeudung der Energie in den Eisenblechen. Ob dies der häufigen Veränderung der Temperatur oder dem Einflusse der Wirbelströme oder beiden Umständen gleichzeitig zuzuschreiben ist, hat noch nicht sicher festgestellt werden können.

Gusseisen wird, seitdem es durch den in magnetischer Hinsicht viel weicheren Stahlguss ersetzt worden ist, nur wenig mehr für elektrische Apparate, bei denen die magnetischen Eigenschaften des Materials in Frage kommen, verwendet.

Gusseisen enthält bekanntlich, neben dem gebundenen Kohlenstoff, noch Graphit als Beimengung. Letzterer scheint die Permeabilität des Eisens jedoch viel weniger nachteilig zu beeinflussen (selbst bei Gehalten bis zu 3%) als der gebundene Kohlenstoff. Geringe Siliciumgehalte selbst bis zu $4^1/_2$% scheinen für die Permeabilität des Gusseisens vorteilhaft, höhere Gehalte jedoch nachteilig zu sein.

Während geringe Beimengungen von Mangan nicht sehr nachteilig sind, ist eine Eisenmanganlegierung mit 12% Mangan[1]) 5000mal weniger magnetisierbar als Gussstahl, also praktisch nahezu unmagnetisch.

Eisenmanganlegierungen mit mehr als 50% Mangangehalt sind dagegen wieder stark magnetisch.

[1]) Hadfields Manganstahl.

VI. Kapitel.

Elektromagnetische Erscheinungen.

1. Kraftlinien eines elektrischen Stromes.

Fliesst durch einen Leiter ein elektrischer Strom, so zeigen sich in dem diesen Leiter umgebenden Raume Kraftlinien. Steckt man durch ein starkes Kartenblatt oder ein Brett, welches man wagerecht hält, einen senkrechten Kupferdraht und führt durch diesen Draht einen kräftigen Strom, so ordnen sich Eisenfeilspäne, die man auf



Fig. 52. Kraftlinien um einen vom Strome durchflossenen Draht.

das Brett streut, in konzentrischen Kreislinien um den Draht herum an. Der Mittelpunkt dieser Linien liegt in der Achse des Drahtes. Nebenstehende Abbildung (Fig. 52) giebt ein Bild von der Anordnung der Eisenfeilspäne unter solchen Umständen. Eine kleine bewegliche Magnetnadel würde sich in der Richtung der Tangente an den durch ihren Drehpunkt gehenden Kreis einstellen. Für einen mit dem positiven elektrischen Strome (den Kopf voran) schwimmenden

Beobachter, der die Magnetnadel anblickt, steht stets der Nordpol der Nadel links[1]) (Ampère'sche Regel).

Ein stromdurchflossener Leiter ist somit in seiner ganzen Länge von einem Felde magnetischer Kraftlinien eingehüllt (vergl. Fig. 53). Die Kraftlinien haften an dem Leiter. Aus den in Kap. V, Abschn. 6 aufgeführten Eigenschaften der Kraftlinien erklären sich dadurch von selbst alle Abstossungs- und Anziehungserscheinungen zwischen stromdurchflossenen Drähten, sowie alle Wirkungen der Ströme auf Magnete und die magnetisierenden Eigenschaften elektrischer Ströme.



Fig. 53. Kraftlinien um einen stromführenden Draht.

In unmittelbarer Nähe des stromdurchflossenen Drahtes ist die Kraftliniendichte am grössten; je grösser die Entfernung vom Drahte wird, um so geringer wird die Häufigkeit der Kraftlinien. Die Kraftliniendichte ist ausserdem der Stromstärke proportional.

2. Die Kraftlinien einer Stromschleife.

Biegen wir einen von einem Strome durchflossenen Draht kreisförmig zusammen (wie dies z. B. Fig. 54 zeigt), so ändert sich innerhalb der Kreisfläche die Gestalt der biegsamen Kraftlinien derart, dass dieselben in der Mitte nahezu parallel die Ebene des

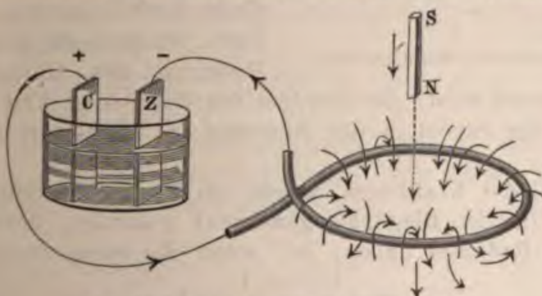


Fig. 54. Kraftlinien einer Stromschleife.

Kreises durchschneiden. Eine in die Mitte des Kreises gestellte Magnetnadel, auf die sonst keine Kräfte ablenkend wirken, würde sich senkrecht zur Kreisfläche stellen und zwar so, dass wir,

[1]) Bekanntlich ist die Richtung der Kraftlinie, nach welcher der Nordpol einer kleinen Magnetnadel zeigt, die positive.

mit dem Strome (den Kopf voran) schwimmend und nach der Magnetnadel hinblickend, den Nordpol der Nadel zur Linken haben würden.

Ein solcher Kreisstrom verhält sich daher wie eine dünne magnetische Scheibe, deren eine Fläche Nordmagnetismus, deren andere Seite Südmagnetismus zeigt. Das magnetische Moment M einer solchen Scheibe ist:

$$M = F \cdot i, \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

worin F der Inhalt der vom Strome umflossenen Fläche und i die Stärke des Stromes ist, der durch den gebogenen Draht fliesst.

3. Solenoide.

Windet man einen Draht schraubenförmig um einen Cylinder, z. B. um ein Glasrohr, und sendet durch den Draht einen Strom, so werden die erzeugten magnetischen Kraftlinien im Innern der Spirale einen der Achse nahezu parallelen Verlauf nehmen und sich ausserhalb des Solenoides schliessen; nur einzelne wenige Kraftlinien werden sich zwischen den Windungen schliessen, wie dies die nebenstehende Fig. 55 darstellt. Eine solche vom Strome durchflossene Drahtspirale, Solenoid genannt, zeigt hinsichtlich der Lage der Kraftlinien die grösste Ähnlichkeit mit einem Magnetstabe und wird sich in jeder Beziehung wie ein solcher verhalten.

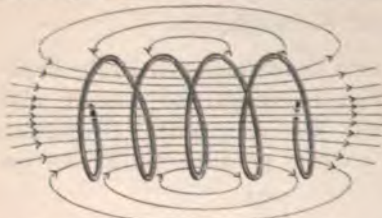


Fig. 55. Kraftlinien eines Solenoides.

Blickt man in der Richtung der Achse von aussen auf das Ende eines Solenoides, so ist das Ende, welches entgegengesetzt der Richtung des Uhrzeigers vom Strome umkreist wird, der Nordpol des Solenoides, und das Ende, um welches der Strom in der Richtung des Uhrzeigers herumläuft, der Südpol.

Die Zahl der Kraftlinien, welche am Ende eines Solenoides von 1 *cm* Länge (in der Diagonale gemessen) austreten, dessen n Windungen den Radius r haben, ist, wenn die Stromstärke i Ampère beträgt:

$$N = \frac{4\pi \cdot n \cdot i}{10\,l} \cdot r^2 \cdot \pi \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ im Innern eines solchen Solenoides, d. h. die Kraftlinienzahl in 1 *qcm* zur Kraftlinienrichtung normalen Fläche, ist somit:

$$\mathfrak{H} = \frac{N}{r^2\pi} = \frac{4\pi n i}{10\,l} \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

$\mathfrak{H}$ ist vom Radius r des Solenoides unabhängig und hängt nur ab von der Anzahl n der Windungen und der Stromstärke i.

Thatsächlich ist in kürzeren Solenoiden die Kraftliniendichte im Innern der Spule nicht gleichförmig. Wegen der Abstossung der Kraftlinien und der entmagnetisierenden Rückwirkung der Enden der Spule, auch weil in unmittelbarer Nähe der Drähte die Kraftliniendichte grösser ist, als in grösserer Entfernung von denselben, ist in kürzeren Solenoiden die Kraftliniendichte an der Innenwand viel grösser, als in der Mitte der Spule.

4. Elektromagnete.

Bringt man in das Innere eines Solenoides einen Eisenstab, so werden in demselben viel mehr Kraftlinien entstehen, als vorher in dem Luftraume, um so mehr, je grösser die Suszeptibilität der Eisensorte ist. Ein auf diese Weise erzeugter Magnet heisst ein Elektromagnet.

Ist $\mathfrak{H}$ die Zahl der Kraftlinien in der Flächeneinheit des Querschnittes eines Solenoides,[1]) so kommen, wenn man das Eisen in das Solenoid bringt, $4\pi \cdot \mathfrak{H} \cdot \varkappa$ neue Kraftlinien in jeder Flächeneinheit hinzu, sodass man (vergl. Kap. V, Gleichung 8) erhält:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} \cdot \mu = \mathfrak{H}\,(1 + 4\pi\varkappa) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

$\mathfrak{B}$ ist dann die Gesamtzahl der Kraftlinien in jedem *qcm* des Eisenquerschnittes.

Während $\varkappa$ den Namen Suszeptibilität führt, nennt man bekanntlich (vergl. Kap. V, Gleich. 9)

$$1 + 4\pi\varkappa = \mu \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

μ die Permeabilität oder magnetische Leitungsfähigkeit der Eisensorte.

Wenn man den Wert von $\mathfrak{H}$ aus Gleichung 3 in Gleichung 4 einsetzt, so erhält man:

$$\mathfrak{B} = \frac{4\pi\,n\,i}{10\,l} \cdot \mu = \frac{4\pi\,n\,i}{10\,l}\,(1 + 4\pi\varkappa), \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

und dies würde gestatten, die Feldstärke oder gesamte Kraftlinienzahl Φ eines innerhalb eines Solenoides befindlichen Eisenstückes vom Querschnitte Q zu berechnen ($\Phi = Q \cdot \mathfrak{B}$), wenn μ oder $\varkappa$ bekannt wäre.

Nun hängt aber bekanntlich $\varkappa$ nicht nur von der Eisensorte, sondern auch von der Gestalt und dem Grade der Sättigung des Eisens mit magnetischen Kraftlinien ab, und dadurch wird die Lösung der Aufgabe ausserordentlich schwierig.

Das Produkt aus der Anzahl n der Windungen und der Stromstärke i wird gewöhnlich kurz als »Zahl der Ampère-

[1]) Wir erinnern hier nochmals daran, dass diese Flächeneinheit senkrecht zur Richtung der Kraftlinien stehen muss.

windungen« oder als »Ampèrewindungen« schlechthin bezeichnet. (Abgekürzt AW.)

Es ist $\frac{4\pi}{10} = 1,257$ und angenähert $\frac{10}{4\pi} = 0,8$.

Die Grösse $\frac{4\pi n' i}{10}$ nennt man reduzierte Ampèrewindungen (n' bezogen auf 1 *cm* Länge des Solenoides) und $\frac{4\pi n i}{10}$ die magnetomotorische Kraft eines Solenoides.

Auf welche Weise das Produkt: Ampèrewindungen $= i \cdot n$ gebildet wird, ob durch Wahl einer grossen Stromstärke i und einer kleinen Windungszahl n, oder durch einen schwachen Strom und viele Windungen bleibt sich, solange der Wert des Produktes $i \cdot n$ derselbe bleibt, hinsichtlich der entwickelten magnetomotorischen Kraft völlig gleich.

Die Aufgabe, den Verlauf der magnetischen Induktion in einem Eisenstücke als Funktion der magnetisierenden Kraft des Solenoides durch eine einfache Formel darzustellen, ist zur Zeit noch nicht in befriedigender Weise gelöst worden.

5. Der magnetische Kraftfluss.

Die wirkliche Durchführung einer Berechnung eines Elektromagneten bereitet aber noch aus einem anderen Grunde erhebliche Schwierigkeiten.

Nur wenn man einen vollkommen in sich geschlossenen Eisenring hat, verlaufen alle Kraftlinien als geschlossene Kurven im Eisen selbst, und es entstehen keine Pole, die auf das Feld zurückwirken. Sonst giebt die entmagnetisierende Rückwirkung der Enden (vergl. Kap. V, Abschn. 17, S. 117) stets zu erheblichen Störungen Anlass.

Nehmen wir also an, wir hätten einen Eisenring längs seines ganzen Umfanges gleichförmig mit einer magnetisierenden Spirale umgeben.[1]) Alsdann wäre die Zahl $\mathfrak{B}$ der Kraftlinien für jede Flächeneinheit des Querschnittes:

$$\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H} = \mu \cdot \frac{4\pi n i}{10\, l}, \quad \ldots \ldots \quad 10)$$

die Feldstärke oder gesamte Kraftlinienzahl Φ:

$$\Phi = \mathfrak{B} \cdot Q = \mu \cdot \frac{4\pi n i}{10\, l} \cdot Q \quad \ldots \ldots \quad 11)$$

[1]) Streng genommen ist allerdings die Anzahl n' der Windungen auf der Längeneinheit am äusseren Umfang etwas kleiner, als am inneren. Das Feld wird also im Eisen nicht ganz gleichförmig sein, sondern von aussen nach innen etwas wachsen. Wählt man jedoch den Durchmesser des mittleren Ringumfanges genügend gross gegen die Dicke des Eisenquerschnittes, so kann man diese Unterschiede vernachlässigen. Für die Länge l hat man in Gleichung 10) den mittleren Umfang des Eisenringes einzusetzen.

Da nun $\frac{4\pi n i}{10}$ die magnetomotorische Kraft F ist, kann man auch schreiben:

$$\Phi = \frac{F}{w}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad 12)$$

wenn man:

$$w = \frac{l}{\mu \cdot Q} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 13)$$

setzt und w als den **magnetischen Widerstand** des Ringes ansieht.

Man erkennt sofort, dass diese Formeln ganz denjenigen entsprechen, welche bei dem Ohm'schen Gesetze angewendet wurden (Kap. I, Abschn. 8, Gleichung 2 und 3):

$$J = \frac{E}{w} \text{ und } w = \frac{k \cdot l}{q}$$

Die magnetomotorische Kraft spielt im **magnetischen Stromkreise** dieselbe Rolle wie die EMK im elektrischen Stromkreise, und der magnetische Widerstand dieselbe Rolle wie der Leitungswiderstand; an Stelle der Stromstärke J beim Ohm'schen Gesetze tritt in Gleichung 11 die erzeugte Kraftlinienzahl oder der Kraftlinienstrom Φ.

Ein tiefgreifender Unterschied zwischen dem Ohm'schen Gesetz und dem magnetischen Ausgleichsgesetz ist aber darin begründet, dass der elektrische Leitungswiderstand eine nahezu unveränderliche, nur wenig mit der Temperatur veränderliche Grösse ist, während der magnetische Widerstand hingegen je nach der Grösse der magnetischen Induktion ausserordentlich verschieden ist.

Beispiel: Ein Hufeisenmagnet aus Krupp'schem Dynamostahl[1]) besteht aus einem Rundstab von 78 *cm* mittlerer Länge und 50 *qcm* Querschnitt (8 *cm* Durchmesser); er ist durch einen 26 *cm* langen Anker von gleichem Querschnitt (8 × 6,25 *qcm*) geschlossen. Die beiden Spulen enthalten zusammen 790 Windungen und werden von einem Strome von 10 Ampère durchflossen.

Wie viele Kraftlinien entstehen?

Im vorliegenden Falle ist:

$$F = \frac{4\pi n i}{10} = 1{,}257 \cdot 790 \cdot 10 = 9930.$$

Ferner ist (vergleiche die nebenstehende Fig. 56):

$$w = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{78}{50} + \frac{24}{50}\right) = \frac{1}{\mu} \cdot 2{,}04.$$

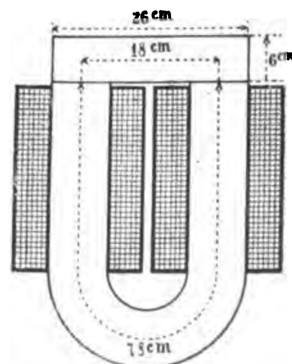


Fig. 56. Hufeisenelektromagnet mit Anker.

[1]) Die Permeabilitätskurve dieses Materials ist auf S. 116, Fig. 49 abgebildet.

Nunmehr ist μ zu bestimmen. Soweit wir es bisher berechnet haben

$$\Phi = \frac{F}{w} = \frac{9930}{\frac{1}{\mu} \cdot 2{,}04},$$

und

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{Q} = \frac{9930}{50 \cdot 2{,}04} \cdot \mu = 97{,}4 \cdot \mu.$$

Nehmen wir zunächst willkürlich

	so finden wir aus vorstehender Formel	aus der Tabelle S. 116 für dieses $\mathfrak{B}$ aber
$\mu = 200$	$\mathfrak{B} = 19480$	μ unter 120
$\mu = 150$	$\mathfrak{B} = 14610$	$\mu = 720$
$\mu = 170$	$\mathfrak{B} = 16560$	$\mu = 240$
$\mu = 175$	$\mathfrak{B} = 17050$	$\mu = 166$
$\mu = 173$	$\mathfrak{B} = 16850$	$\mu = 180$
$\mu = 174$	$\mathfrak{B} = 16950$	$\mu = 175$

Diesen Wert von $\mu = 174$ benutzen wir und finden damit:

$$\Phi = \mathfrak{B} \cdot Q = 17000 \cdot 50 = 850000.$$

Da ein kleiner Teil der Kraftlinien auch in einem solchen Fa wie ihn das vorstehende Beispiel behandelt, austritt und sich du die Luft schliesst, wird in Wirklichkeit Φ etwas kleiner sein.

Für sehr dicke Spulen, bei welchen ein Teil der Windun nicht unmittelbar auf dem Eisen aufliegt, wird für die äuss Drahtlage der Magnetisierungsraum mit Luft, für welche $\mu = 1$ und mit Kupfer, für welches μ noch kleiner ist, ausgefüllt. Dadu wird der magnetische Widerstand vergrössert und infolge davon ebenfalls verkleinert.

Für genauere Rechnungen ist es ratsam, die magnetischen Eig schaften der verwendeten Eisensorte durch eigene Beobachtungen ermitteln.

Die strenge Anwendung der dem Ohm'schen Gesetze na gebildeten Gleichung 12:

$$\Phi = \frac{F}{w}$$

auf Elektromagnete, wie sie in der Elektrotechnik besonders hä vorkommen, stösst auf fast unlösbare Schwierigkeiten. Die Formel

$$w = \frac{1}{\mu \cdot Q}$$

ist nämlich nur für vollständig isolierte Leiter von linearer Ges richtig. Bei allen in der Praxis vorkommenden Elektromagn aber ist der Querschnitt gegen die Länge durchaus nicht zu nachlässigen. Die mittlere Weglänge der Kraftlinien (l) kann da meist nur mit ziemlich grober Annäherung aus der Zeichnung schätzt werden.

Ausserdem ist die Luft zwar ein schlechter, aber immerhin Leiter der Kraftlinien. Ein Teil der Kraftlinien erreicht daher Polflächen eines Elektromagneten gar nicht; in verschiedenen Q

schnitten ist deshalb die Zahl der Kraftlinien verschieden, sie nimmt von der Mitte nach den Enden zu ab. Mit der Zahl der Kraftlinien aber ändert sich wiederum μ, die Permeabilität; auch diese ist somit für verschiedene Stellen eines Elektromagneten verschieden. Dazu kommt, dass mit zunehmender Sättigung μ rasch abnimmt. Je mehr sich daher das Eisen der Sättigung nähert, um so grösser wird die Zahl der Kraftlinien werden, die sich durch die Luft schliessen, um so grösser wird, wie man sich ausdrückt, die »magnetische Streuung.«

6. Der geschlitzte Ring, magnetische Streuung.

Vollkommen geschlossene eiserne Ringe kommen nur als Kerne von Transformatoren oder als Probestücke für magnetische Materialprüfungen vor. Viel öfter begegnet man in der elektrotechnischen Praxis dem Falle, dass der magnetische Kreis an einer oder mehreren Stellen durch einen Luftzwischenraum unterbrochen ist, dass Schlitze oder Fugen vorhanden sind, die von einem nichtmagnetischen Materiale ausgefüllt werden.

An dem Schlitze tritt dann freier Magnetismus auf, der dadurch entsteht, dass magnetische Kraftlinien in den umgebenden Raum austreten.

Dieser freie Magnetismus übt, wie beim magnetisierten Ellipsoide oder Stabe, eine entmagnetisierende Rückwirkung aus. Die Grösse der entmagnetisierenden Wirkung, die erhebliche Vergrösserung des magnetischen Widerstandes, kann im allgemeinen jedoch nur auf dem Wege des Versuches ermittelt werden.

Wird ein solcher Schlitz mehr und mehr verengt, so nimmt die entmagnetisierende Kraft zwar ab, aber sie bleibt noch immer sehr merklich bestehen, auch wenn das vorher getrennte Eisen sich wieder vollständig berührt; selbst wenn die getrennten Enden wieder zusammengeschweisst werden, verschwindet die entmagnetisierende Rückwirkung der früheren Trennungsstelle nicht vollständig.

Da die Kraftlinien sich in Luft viel stärker abstossen, als im Eisen, sperren sie sich an den Enden des Schlitzes und divergieren beim Austritt in den Luftraum, etwa so, wie dies die Fig. 57 andeutet.

Misst man den Kraftlinienfluss innerhalb des Schlitzes und dividiert diese Grösse durch den mittleren Kraftlinienfluss im Eisen selbst, so erhält man einen echten Bruch ν, den man als Streuungskoëffizient bezeichnet.

Der Betrag des Streuungskoëffizienten hängt hauptsächlich von dem Verhältnis der Dicke des eisernen Ringes zur Weite des Schlitzes, von der sogenannten relativen Schlitzweite ab.

Die meisten Fälle, in welchen wir in der Elektrotechnik mit Elektromagneten zu thun haben, lassen sich schematisch durch die nebenstehende Abbildung (Fig. 57) darstellen. In derselben treten die Kraftlinien bei N aus dem Nordpole des Elektromagneten in einen Luftraum aus, von da in ein zweites Stück Eisen A und als-

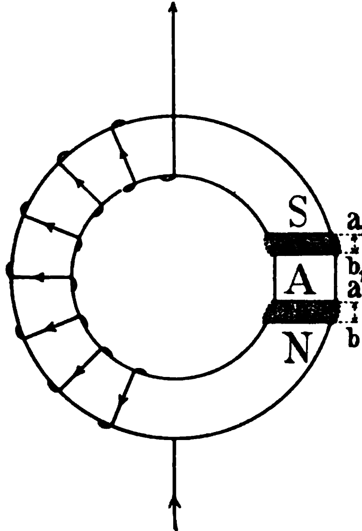


Fig. 57. Ringelektromagnet mit Anker und zwei Schlitzen.

dann durch einen gleich grossen Luftraum in den Südpol S des Elektromagneten wieder ein. Man berechnet alsdann nach Formel 13 die magnetischen Widerstände der einzelnen Teile des magnetischen Kreises. Nennen wir w_1 den magnetischen Widerstand, den der Elektromagnet darbietet, w_2 den magnetischen Widerstand eines der beiden Lufträume, welche von den Kraftlinien durchschnitten werden müssen, und w_3 den magnetischen Widerstand des Zwischenstückes, so ist alsdann

$$\Phi = \frac{1,257 \cdot n \cdot i}{w_1 + 2\, w_2 + w_3} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 14)$$

Beträgt die magnetische Streuung ν, so werden nicht Φ, sondern nur $\Phi \cdot \nu$ Kraftlinien erzeugt. ν ist dann ein echter Bruch.

7. Bestimmung der magnetischen Widerstände.

Für die Bedürfnisse des praktischen Elektrotechnikers ist es zumeist bequemer, wenn der vorstehenden Gleichung eine etwas andere Gestalt gegeben wird, nämlich:

$$\frac{4\pi}{10} \cdot n \cdot i = \Phi \cdot (w_1 + 2\, w_2 + w_3)$$

oder $\frac{4\pi}{10} \cdot n \cdot i = \frac{\Phi \cdot l_1}{\mu_1 \cdot Q_1} + 2 \frac{\Phi \cdot l_2}{\mu_2 \cdot Q_2} + \frac{\Phi \cdot l_3}{\mu_3 \cdot Q_3}.$

Für $\frac{\Phi}{Q}$ kann man den schon früher gebrauchten Buchstaben $\mathfrak{B}$ gebrauchen und erhält:

$$\frac{4\pi}{10} n\, i = \mathfrak{B}_1 \cdot l_1 \cdot \frac{1}{\mu_1} + 2\, \mathfrak{B}_2 \cdot l_2 \cdot \frac{1}{\mu_2} + \mathfrak{B}_3 \cdot l_3 \cdot \frac{1}{\mu_3}.$$

Da nun, wie bereits bekannt, μ für Luft $= 1$[1]) ist, wird

$$\frac{1}{\mu_2} = 1.$$

Da μ, wie wir bereits früher erwähnten, auch eine Funktion von $\mathfrak{B}$ ist, kann man ferner schreiben:

$$\frac{\mathfrak{B}}{\mu} = \varphi(\mathfrak{B})$$

und hat dann:

$$\frac{4\pi}{10} \cdot n\, i = l_1\, \varphi(\mathfrak{B}_1) + 2\, \mathfrak{B}_2\, l_2 + l_3\, \varphi(B_3) \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

Für die Praxis ist es unzweifelhaft bequemer, auch den Proportionalitätsfaktor $\frac{4\pi}{10}$ auf die rechte Seite zu schaffen und

$$\frac{10}{4\pi} \cdot \varphi(\mathfrak{B}) = f(\mathfrak{B}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

zu setzen. Alsdann erhält man:

$$n \cdot i = l_1 \cdot f(\mathfrak{B}_1) + 2 \cdot l_2 \cdot \frac{\mathfrak{B}_2 \cdot 10}{4\pi} + l_3 \cdot f(\mathfrak{B}_3) \quad . \quad . \quad 17)$$

Zur Erleichterung der Bestimmung der Werte von $f(\mathfrak{B})$ sind nun auf Grund zahlreicher messender Versuche mittlere Kurven konstruiert worden, welche gestatten, für ein gegebenes $\mathfrak{B}$ (Kraftlinienzahl für 1 *qcm* Eisen-Querschnitt) die Grösse $f(\mathfrak{B}) = \varphi(\mathfrak{B}) \cdot \frac{10}{4\pi}$, d. i. die Anzahl von Ampèrewindungen für jedes *cm* Länge des Kraftlinienweges auf graphischem Wege zu bestimmen. Wir teilen in Fig. 58 derartige Kurven mit, fügen aber nochmals hinzu, dass, wenn grössere Genauigkeit gewünscht wird, jeder Konstrukteur die entsprechenden Kurven für die von ihm verwendeten Eisensorten selbst ermitteln muss.

---

[1]) Bei praktischen Aufgaben, z. B. bei der Berechnung der dynamoelektrischen Maschinen wird daher für Luft $\frac{10}{4\pi}\,\mu$ gleich 0,8 gesetzt.

Beispiel: **Wie viele Ampèrewindungen sind erforderlich, um bei nachstehend (vergl. Fig. 59) gezeichnetem Gestelle einer Dynamomaschine mit Ringanker im Anker einen Kraftlinienstrom von 256 000 Einheiten zu erzeugen?**

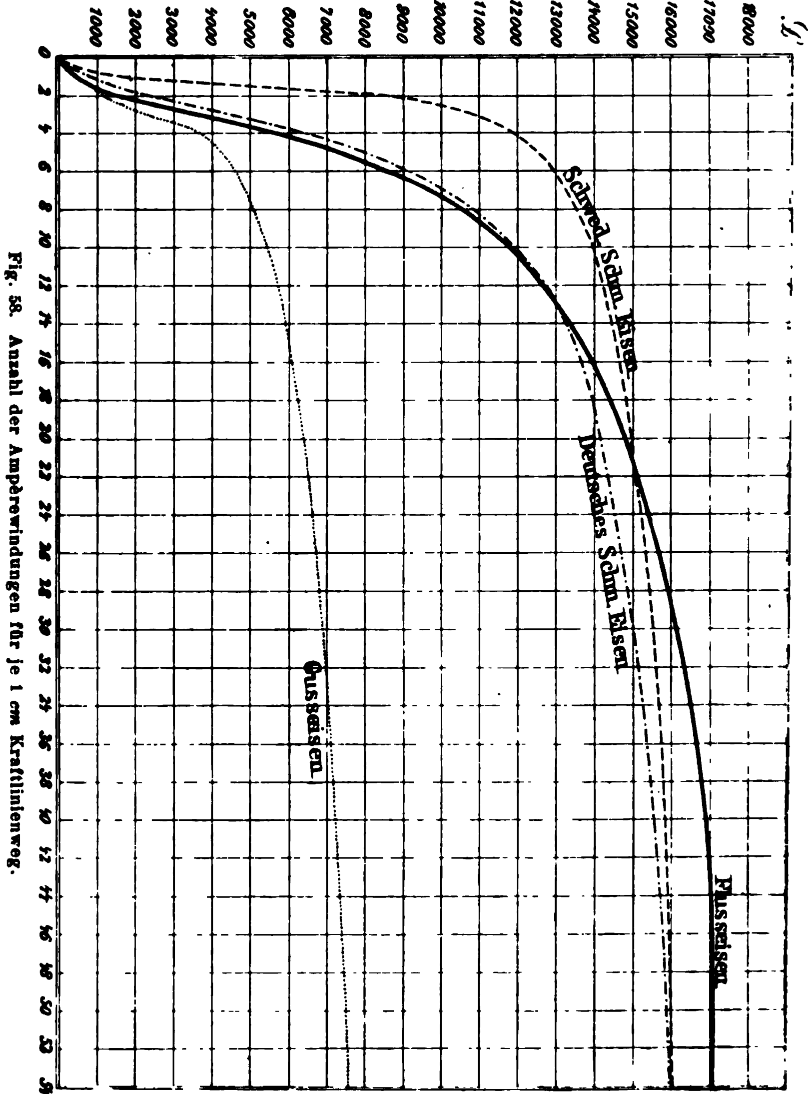


Fig. 58. Anzahl der Ampèrewindungen für je 1 *cm* Kraftlinienweg.

Der Kern des Elektromagneten bestehe aus Flusseisen, sei 78 *cm* lang und habe 50 *qcm* Querschnitt. An den Enden dieses Elektromagneten sitzen 6 *cm* hohe Polschuhe aus Schmiedeeisen mit 48 *qcm* Querschnitt, die nach innen zu

mit 10 *cm* Durchmesser cylindrisch ausgebohrt sind. Zwischen diesen Polschuhen befinde sich ein schmiedeeiserner Ring(anker) von 9 *cm* äusserem und 5 *cm* innerem Durchmesser (also 2 *cm* Dicke) und 8 *cm* Länge.

Um in den Anker wirklich die gewünschte Zahl wirksamer Kraftlinien eintreten zu lassen, müssen, weil sich an den Polschuhen und beim Durchschreiten des Luftraumes eine Anzahl Kraftlinien ausserhalb des Ankereisens schliessen oder zerstreut werden, im Schenkel etwas mehr Kraftlinien erzeugt werden. Wir wollen annehmen, dass die Streuung nur 10% betrüge. Dann müssen aus den Endflächen des Elektromagneten

$$\Phi = \frac{256000}{0,90} = 284400 \text{ Kraftlinien}$$

austreten.

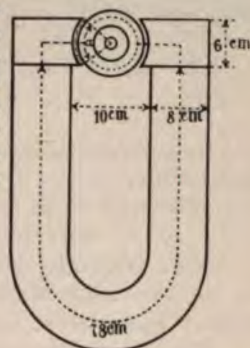


Fig. 59. Kraftlinienweg in einer Dynamomaschine.

1. Elektromagnetschenkel.

Da der Querschnitt 50 *qcm* beträgt, ist

$$\mathfrak{B} = \frac{284400}{50} = 5688.$$

Aus der Tafel finden wir f ($\mathfrak{B}$) für Flusseisen = 4. Die Länge beträgt 78 *cm*, somit

$$1 \cdot f(\mathfrak{B}) = 4 \times 78 = 312.$$

2. Polschuhe.

In jedem Polschuh ist der Querschnitt 48 *qcm*, die mittlere Länge des Kraftlinienweges in jedem derselben 3 + 4 = 7, in beiden zusammen somit 14 *cm*. $\mathfrak{B}$ beträgt, wenn wir annehmen, dass durch den Polschuh nur alle nützlich verwendeten Kraftlinien, nicht aber die durch Streuung verlorenen hindurchgehen,

$$\mathfrak{B} = \frac{256000}{48} = 5330.$$

Für $\mathfrak{B}$ = 5330 ist aus der Kurve für Schmiedeeisen f ($\mathfrak{B}$) = 2,7.

3. Der Luftzwischenraum.

In der Abbildung ist

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{3}{5},$$

folglich

$$\frac{\alpha}{2} = 36^0\,52', \quad \alpha = 73^0\,44', \quad \frac{\alpha}{180} = 0,410.$$

Der Querschnitt des Luftzwischenraumes ist somit:

$$9,5 \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \frac{\alpha}{180} \cdot 8 = 48,9 \text{ } qcm.$$

Die Länge eines Luftzwischenraumes beträgt 0,5 *cm*; dies ergiebt für zwei Luftzwischenräume l = 1 und somit ist

$$\mathfrak{B} = \frac{256000}{48,9} = 5235$$

und

$$2\,\mathfrak{B}_2 \cdot l_2 = 5235.$$

Die Grösse muss noch mit $\frac{10}{4\pi}$ multipliziert werden, und dies ergiebt:

$$\frac{2\,\mathfrak{B}_2 \cdot l_2 \cdot 10}{4\pi} = 4173.$$

4. Der Eisenring (Anker).

Der Querschnitt des Ringes ist 2 × 2 × 8 *qcm*, da sowohl durch die obere, als durch die untere Ringhälfte je die halbe Anzahl Kraftlinien hindurchgehen.

Um die mittlere Weglänge im Anker zu bestimmen, benutzen wir den mittleren Radius des Ringeisens $= \frac{5+9}{4} = 3,5$ *cm*, und nehmen an, die mittleren Kraftlinien legen gerade einen Halbkreis zurück. Das giebt

$$3,5 \cdot \pi = 11.$$

Die Zahl Φ der Kraftlinien im ganzen Ankereisen beträgt 256000, somit ist

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{Q} = \frac{256000}{2 \times 2 \times 8} = 8000.$$

Nach der Kurve für Schmiedeeisen gehört zu $\mathfrak{B} = 8000$ der Wert $f(\mathfrak{B}) = 4,9$. Nunmehr ist

$$l_3 \cdot f(\mathfrak{B}_3) = 4,9 \times 11 = 54.$$

Wir finden somit

$$n\,i = 314 + 31 + 4173 + 54 = 4570 \text{ Ampèrewindungen.}$$

Man erkennt, dass die Zahl der Ampèrewindungen, die nötig ist, um den magnetischen Widerstand des Luftraumes zu überwinden, weitaus am meisten ins Gewicht fällt.

Für Anwendungen in der Praxis ist noch zu bemerken, dass die so gefundenen Zahlen für die Ampèrewindungen im allgemeinen zu klein ausfallen und mit Rücksicht auf die Streuung der Kraftlinien mehr vergrössert werden müssen. Will man die Streuung berücksichtigen, so würde man die Werte von $\mathfrak{B}$ nach Massgabe der Grösse derselben noch weiter zu vergrössern haben. Mit Rücksicht auf die Streuung würde somit die Formel 17 lauten:

$$n\,i = l_1 \cdot f(\nu_1 \mathfrak{B}_1) + 2\,\mathfrak{B}_2 \cdot l_2 \cdot \frac{10}{4\pi} + l_3 \cdot f(\nu_3 \cdot \mathfrak{B}_3) \quad . \quad . \quad 18)$$

Für die Elektromagnete hat ν_1 je nach der Maschinengattung einen Wert von 1,2 für aufrechte Hufeisenmaschinen, 1,3 für verkehrte Hufeisenmaschinen (Edison-Maschinen), Lahmeyer-Maschinen, 2,0 für alte Schuckert-Flachringmaschinen, 1,5 für Maschinen des Manchestertypus.[1])

Für das Ankereisen bei Trommelankern genügt es meist $\nu_3 = 1$ zu nehmen. Bei Ringankern wählt man $\nu_3 = 1,1$.

ν ist um so grösser zu wählen, je höher die magnetische Sättigung ist, mit der gearbeitet wird.

8. Die Abmessungen der Kerne und Spulen der Elektromagnete.

In der Praxis geht man mit der Sättigung nicht gern über $\mathfrak{B} = 10000$ bis 12000 Kraftlinien für 1 *qcm* hinaus. Dadurch wird der Querschnitt der Magnetschenkel bestimmt. Die Länge der Schenkel wird durch die Grösse der Spulen bedingt.

[1]) Genauere Werte der Streuungskoeffizienten ν werden späterhin für verschiedene Maschinengrössen und verschiedene Arten von Maschinen, gelegentlich der Besprechung der Berechnungsweise der Dynamomaschinen mitgeteilt.

Wenn man die Zahl n i der Ampèrewindungen für einen Elektromagnet bestimmt hat, entscheidet man sich zunächst über die Stärke i des Stromes, mit dem magnetisiert werden soll. Danach bestimmt man die Dicke des Drahtes, mit der die Bewickelung des Solenoids (auch Spule genannt) erfolgen soll. Man rechnet ungefähr auf jeden Quadratmillimeter Kupferquerschnitt des Drahtes 1,2 bis 2 Ampère Stromstärke.

Bezeichnet r den inneren, R den äusseren Radius einer Spule mit kreisförmigem Querschnitt, h den inneren Durchmesser des Drahtes mit Umspinnung, d die Länge der Spule, m die Zahl der Drahtlagen und n die gesamte Anzahl der Windungen, so ist, ganz dichtes Wickeln vorausgesetzt, die gesamte Länge L des zur Herstellung der Spule erforderlichen Drahtes:

$$\left.\begin{aligned} L &= \frac{\pi \cdot h}{d^2} \cdot (R^2 - r^2) = \frac{\pi \cdot h}{d^2} \cdot (R + r) \cdot (R - r) \\ m &= \frac{R - r}{d}, \quad n = \frac{R - r}{d^2} \cdot h \end{aligned}\right\} \quad . \quad 17)$$

Meist ist für eine Spule r und h durch die Gestalt des Elektromagneten bestimmt. Dann ist die äussere Dicke der Spule R

$$R = r + \frac{n \cdot d^2}{h} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 18)$$

Oder es ist das Volumen, das die Wickelung ausfüllt, der »Wickelungsraum« $V = (R^2 - r^2) \cdot \pi \cdot h$ bestimmt.

Man kann auch schreiben:

$$L = \frac{V}{d^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 19)$$

und dieser Ausdruck ist auch für Spulen mit anderem Querschnitt als einem kreisförmigen brauchbar.

Der Widerstand W der Spule ist, wenn q der Kupferquerschnitt des Drahtes ist:

$$W = 0{,}022 \frac{L}{q}$$ [1]

Damit der Strom i wirklich durch die Spule geht, muss an den Enden derselben eine Spannungsdifferenz E

$$E = i \cdot W$$

vorhanden sein.

Der Energieverlust, d. h. die Anzahl Volt-Ampère (Watt), die in jeder Sekunde in der Spule verbraucht werden, beträgt: $i^2 \cdot W$.

---

[1]) Für Widerstandsberechnungen an elektrischen Apparaten setzt man stets den Gebrauchszustand voraus, bei dem die Drähte erwärmt sind. Man benutzt deshalb, statt des Leitungskoëffizienten k_0 für Kupfer, einen um 15% bis 20% höheren Wert k = 0,02 bis k = 0,022.

9. Die Wirkungen eines Stromes auf einen beweglichen Magnet. Tangentenbussole.

Wenn ein Strom von i Ampère Stärke in einem Kreise von R *cm* Radius fliesst, so erzeugt er (Kap. VI, Abschn. 3, Formel 1, S. 128) in der Mitte des Kreises ein Feld von der Stärke $\mathfrak{H}$:

$$\mathfrak{H} = \frac{2\pi i}{10 R}.$$

Sind aber n kreisförmige Windungen vorhanden, die eine Spule bilden, deren Breite und Dicke gegen den Durchmesser des Kreises vernachlässigt werden kann, so ist die Feldstärke im Mittelpunkte der Spule:[1])

$$\mathfrak{H} = \frac{2\pi \cdot i \cdot n}{10 R} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 20)$$

Bringen wir in die Mitte einer solchen vertikal gestellten, vom Strome durchflossenen Spule eine kleine, um eine vertikale Achse bewegliche Magnetnadel, so würde diese sich senkrecht zur Ebene des Kreises stellen, wenn sonst keine magnetischen Kräfte auf die Nadel wirkten.

Auf die Nadel wirkt aber gleichzeitig das Magnetfeld des Erdmagnetismus mit seiner Horizontalkomponente H (ungefähr = 0,2 absolute Einheiten). Die beiden Felder werden sich daher nach dem Parallelogramm (vergl. Kap. V, Fig. 47, S. 110) zusammensetzen und die Magnetnadel wird sich in die Richtung der Diagonale des Parallelogrammes einstellen. Hatte man nun anfänglich die Windungen der Spule genau in den magnetischen Meridian eingestellt, so steht das durch die Wirkung des Stromes erzeugte Feld $\mathfrak{H}$ senkrecht auf dem Felde des Erdmagnetismus H, wie dies Fig. 60 darstellt.



Fig. 60. Ablenkung der Nadel einer Tangentenbussole.

Nennt man den Winkel, um welchen die Magnetnadel aus der Ebene der Windungen, also aus dem magnetischen Meridian, abgelenkt worden ist, γ, so ist, wie man aus der Figur sofort erkennt:

$$\tan \gamma = \frac{\mathfrak{H}}{H},$$

oder, wenn man für $\mathfrak{H}$ seinen Wert einsetzt:[2])

$$\tan \gamma = \frac{2\pi \cdot i \cdot n}{10 R \cdot H}.$$

---

[1]) Für R wird in einem solchen Falle der mittlere Halbmesser der Windungen gesetzt.

[2]) Diese Formel gilt genau für kleine Winkel. Für beliebig grosse Ablenkungswinkel φ bleibt der Fehler unter 1 Prozent, so lange die Länge l der Nadel $l < \frac{1}{6}$ R ist.

Hieraus folgt: $$i = \frac{10 \cdot H \cdot R}{2\pi n} \cdot \tan\gamma \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 21)$$

Da für dasselbe Instrument $\frac{10 H R}{2\pi n}$ konstant ist, wenn man von den kleinen örtlichen und zeitlichen Änderungen der Horizontalkomponente H des Erdmagnetismus absieht, so ist:

$$i = C \cdot \tan\gamma \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 22)$$

Ein derartiges Instrument kann somit zur Messung der Stromstärke dienen, wenn man den **Reduktionsfaktor** C kennt.

C kann entweder aus den Grössen H, R und n berechnet werden, oder man kann C dadurch bestimmen, dass man die Ablenkung γ für eine bekannte Stromstärke i misst.

Beispiel: Der Reduktionsfaktor einer Tangentenbussole soll bestimmt werden.

In den Stromkreis einer Akkumulatorenbatterie schaltet man ein Knallgasvoltameter, die Tangentenbussole und einen Regulierwiderstand, sodass der Strom alle drei Apparate nacheinander durchläuft. Der Regulierwiderstand dient nur dazu, während der Dauer des Versuches den Ausschlag der Nadel der Tangentenbussole unveränderlich zu erhalten.

Als man den Strom 5 Minuten hindurch gehen liess, wurden 197 *ccm* Knallgas entwickelt; die Temperatur des Gases betrug 20° C, der Druck, unter dem dasselbe stand, 743 *mm*. Die Nadel der Tangentenbussole zeigte einen Ausschlag von $50^1/_4{}^0$.

Das auf 0° und 760 *mm* Druck reduzierte Knallgasvolumen V beträgt:

$$V = \frac{197 \cdot 743 \cdot 273}{760 \cdot (273 + 20)} = 174{,}9.$$

Da nun 1 Ampère in einer Minute 10,44 *ccm* Knallgas entwickelt, ist die Stromstärke i:

$$i = \frac{174{,}9}{5 \cdot 10{,}44} = 3{,}350 \text{ A}.$$

Hiernach ist:

$$3{,}438 = C \cdot \tan 50^1/_4{}^0, \quad C = \frac{3{,}350}{\tan 50^0\, 15'} = 2{,}787.$$

Liegt die Magnetnadel, auf welche ein Kreisstrom wirkt, nicht im Mittelpunkte des Kreises, sondern steht sie in der Normalen auf dem Mittelpunkte der Kreisfläche um a *cm* ab, so ist das Feld $\mathfrak{H}'$, welches der Kreisstrom in der Entfernung a vom Mittelpunkte entwickelt:

$$\mathfrak{H}' = \frac{2\pi i}{10 R} \cdot \frac{R^3}{(R^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} = H \cdot \frac{R^3}{(R^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \quad . \; . \quad 23)$$

Aus dieser Formel folgt, dass die stärkste anziehende Wirkung eines Kreisstromes und somit auch eines Solenoides in der Mitte erfolgt und dass Eisenmassen nach der Mitte eines Kreisstromes oder eines Solenoides hingezogen werden. Da ausserdem diese Anziehung der Stromstärke i proportional ist, so kann die Grösse dieser Anziehungskraft als Mass der Stromstärke benutzt werden. Von

diesem Gedanken ausgehend, sind zahlreiche Strommessinstrumente konstruiert worden.

Da Magnete leicht unter dem Einflusse neuer starker magnetisierender Kräfte oder unter der Einwirkung von Erschütterungen die Polstärke ändern, wählt man für die Herstellung von Strommessern meist weiches Eisen, auf welches ein Solenoid anziehende Kräfte ausübt. Die Abmessungen dieser Eisenmassen nimmt man so klein, dass sie auch durch die schwächsten der zu messenden Ströme, welche das Solenoid durchfliessen, schon bis zur Sättigung magnetisiert werden.

10. Die Einrichtung der Tangentenbussole.

Fig. 61 zeigt die Einrichtung einer Tangentenbussole, welche nach Angaben von F. Kohlrausch von Hartmann & Braun (Bocken-

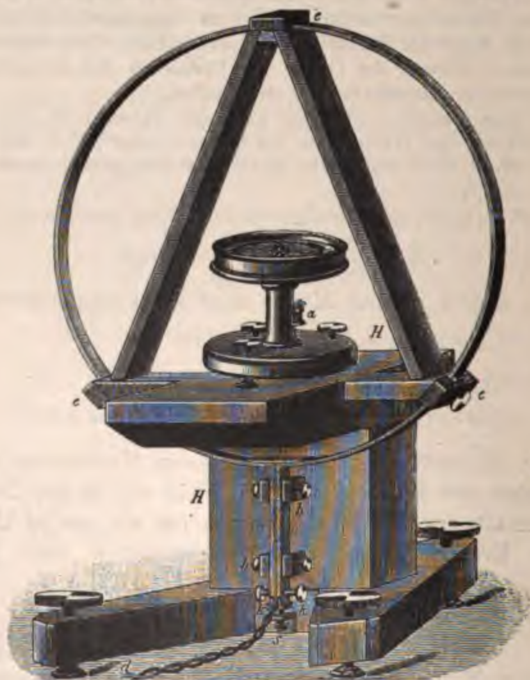


Fig. 61. Tangentenbussole.

heim-Frankfurt a. M.) hergestellt wird. Der massive Kupferreif hat genaue Kreisform und wird durch das aus wohlgetrocknetem Holze hergestellte Dreieck in seiner Lage und Form erhalten. Unten ist

der Ring aufgeschnitten und endet in zwei parallele, gerade Kupferstreifen b, b', die durch ein dünnes Elfenbeinblättchen voneinander isoliert sind. Durch die beiden Klemmschrauben k und k' wird der Strom, den man durch zwei zusammengedrillte Kabelstücke, oder zwei genau parallel geführte Drähte zu- und ableitet, dem Ringe zugeführt.

Die Magnetnadel ruht entweder (wie in der Figur) durch ein Achathütchen auf einer Spitze, um die sie sich ohne wesentliche Reibung drehen kann, oder sie hängt besser an einem Coconfaden. Ein längerer, mit der kleinen Nadel fest verbundener Aluminiumzeiger spielt auf einer Kreisteilung, an der man die Nullstellung und die Ablenkungswinkel ablesen kann. Durch die Fussschrauben kann man den Ring genau vertikal stellen.

Um sich vor Fehlern zu schützen, die von unvollkommener Einstellung des Ringes in den magnetischen Meridian herrühren, schickt man den zu messenden Strom einmal in der einen, dann in der entgegengesetzten Richtung durch den Ring und nimmt das Mittel aus den abgelesenen Winkeln.

Bei sehr kleinen (unter 20^0) und bei sehr grossen Ablenkungswinkeln (über 70^0) machen sich die unvermeidlichen Ablesungsfehler schon sehr geltend. Am genauesten misst die Tangentenbussole Winkel in der Nachbarschaft von 45^0.

11. Das gewöhnliche Galvanometer nach Schweigger-Poggendorff und nach Nobili.

Um sehr schwache Ströme zu messen, bedient man sich solcher Instrumente, bei welchen die Windungen dem beweglichen Magneten sehr nahe sind; man nennt diese Apparate Galvanometer.

Wenn man stromdurchflossene Windungen bis nahe an den Magneten herantreten lässt, so gilt das Gesetz, dass die Tangenten der Ablenkungswinkel den Stromstärken proportional sind, nur noch für sehr kleine Winkel. Da aber die Tangenten sehr kleiner Winkel mit den Winkeln selbst vertauscht werden können, kann man dann die Stromstärken den Winkeln selbst proportional setzen.

Will man eine derartige Vorrichtung auch für grössere Ablenkungswinkel benutzen, so muss man die Stromstärken, welche den einzelnen Ausschlagswinkeln entsprechen, durch besondere Versuche, etwa durch Vergleich mit einem Silbervoltameter oder mit einem anderen Strommessinstrumente, vorher bestimmen. Man nennt diese Ermittelung der Stromstärke, welche einem bestimmten Ausschlagswinkel der Magnetnadel entspricht, das Aichen des zur Messung des Stromes dienenden Instrumentes.

Fig. 62 giebt eine Vorstellung von dem Verlaufe der Drahtwindungen um eine Magnetnadel im Schweigger-Poggendorff'schen Galvanometer. Um die Nadel leicht beweglich zu machen, wird dieselbe an einem torsionsfreien Coconfaden aufgehängt.

Nobili hat das Galvanometer dadurch wesentlich empfindlicher gemacht, dass er statt einer Magnetnadel deren zwei, möglichst gleichstark magnetisierte verwendete, die entgegengesetzt gerichtet und miteinander fest verbunden sind. Da die eine Nadel innerhalb, die andere über den vom Strome durchflossenen Windungen hängt, werden beide Nadeln in gleichem Sinne von dem Strome abgelenkt.

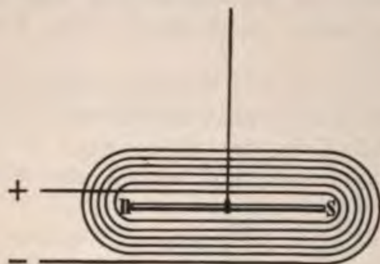


Fig. 62. Schweigger-Poggendorff'scher Galvanometer.

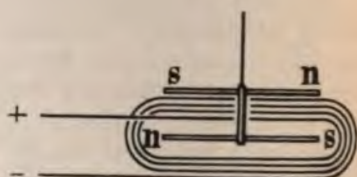


Fig. 63. Galvanometer mit astatischem Nadelpaar.

Während das Nadelpaar vom Erdmagnetismus nur mit der Differenz der Wirkungen auf beide gerichtet wird, summieren sich die Wirkungen des Stromes auf beide Nadeln.

Fig. 63 zeigt die Stellung der Windungen zu den Nadeln. Die nachfolgende Abbildung (Fig. 64) zeigt die äussere Einrichtung eines solchen Galvanometers mit zwei entgegengesetzt gerichteten Nadeln (einem astatischen Nadelpaare). Am oberen Ende des Drahtes, der beide Nadeln verbindet, ist ein leichter Zeiger angebracht; dieser Zeiger spielt über einer Kreisteilung, die über der oberen Nadel angebracht wird.

Bei manchen Galvanometern ist auch jede Nadel des astatischen Paares von einer besonderen Drahtwickelung umgeben, sodass sich die ablenkenden Stromwirkungen beider Wickelungen auf die Nadeln unterstützen.

12. Das Spiegel-Galvanometer.

Für genauere Messung sehr kleiner Winkel bedient man sich zumeist der Spiegelablesung.

Mit dem drehbaren Magnet wird ein kleiner leichter, aus Mikroskopdeckglas hergestellter Spiegel verbunden. Auf diesen Spiegel S blickt man durch ein Fernrohr, welches im Gesichtsfeld ein Faden-

kreuz trägt. Man stellt das Fernrohr auf das Spiegelbild einer Skala ss ein, welche sich über oder unter dem Fernrohr befindet.

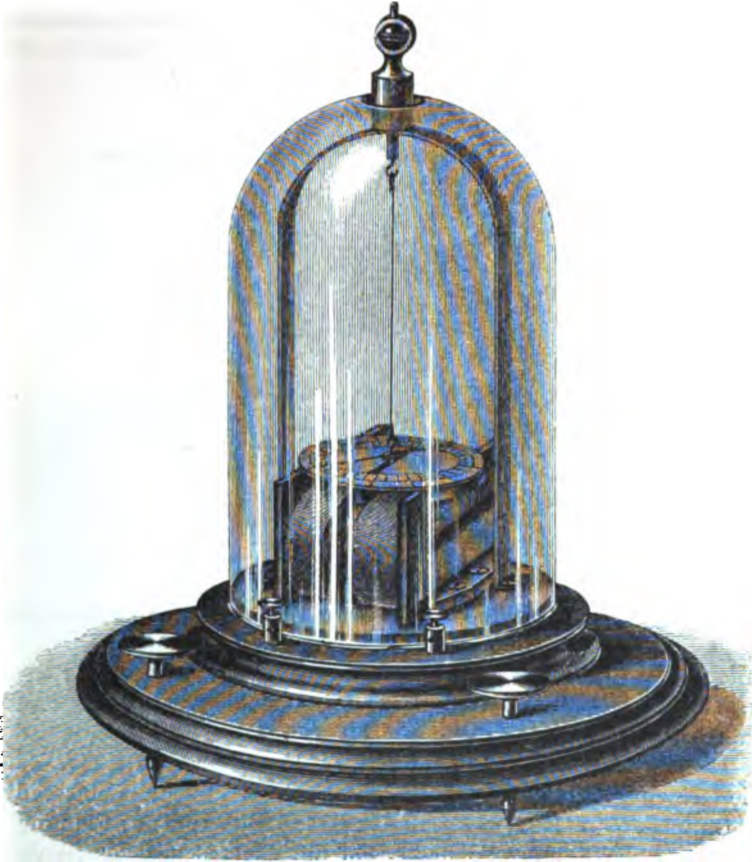


Fig. 64. Galvanometer mit astatischem Nadelpaar.

Dreht sich nun der Spiegel mit dem Magneten um einen Winkel α, (vergl. Fig. 65), so dreht sich auch die Normale auf die Spiegelebene (das Einfallslot der Lichtstrahlen) um α. Da der Winkel zwischen dem einfallenden Lichtstrahle und der Normalen zur Spiegelebene stets gleich dem Winkel zwischen diesem Einfallslote und dem am Spiegel reflektierten Strahle ist, so dreht sich somit der reflektierte Strahl um 2α. Deckte sich vor der Drehung das Spiegelbild des Punktes M der Skala mit dem Fadenkreuze des Fernrohres, so wird nunmehr das Bild des Punktes A mit dem

Fadenkreuze im Fernrohre zusammenfallen. Es ist nun aber $\frac{MA}{D} = \tan 2\alpha$, man kann demnach aus den Längen MA und D die Grösse des Winkels 2α und damit auch den Winkel α bestimmen, um den der Magnet und der mit ihm verbundene Spiegel abgelenkt

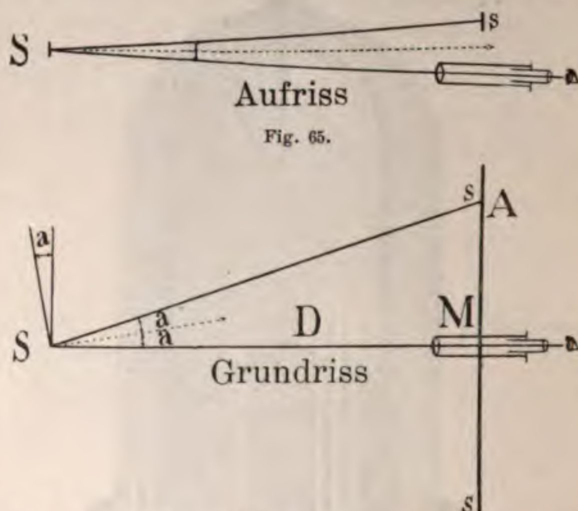


Fig. 65.

Fig. 65a. Anordnung von Fernrohr, Spiegel und Skala beim Spiegelgalvanometer.

worden war. Für sehr kleine Ablenkungen kann man ohne weiteres die Winkel α den auf der Skala abgelesenen Strecken MA proportional setzen.

Ersetzt man das Auge durch eine leuchtende Linie (z. B. den Faden einer Glühlampe) und das Fernrohr durch eine Linse, die in der Entfernung MS + SA ein deutliches Bild von der Flamme entwirft, so erblickt man das helle Bild des Lichtes auf der Skala und kann aus der Stellung desselben auf der Skala auf die Grösse des Ablenkungswinkels schliessen.

Fig. 66 zeigt beispielsweise ein Ablesefernrohr mit Skala, und Fig. 67 eine Laterne mit Skala und Linse für Beobachtung eines Lichtbildes, beides in Anordnungen, wie sie von Siemens & Halske für die Beobachtungen an Spiegelgalvanometern geliefert werden.

Die zuerst beschriebene Methode der Bestimmung der Winkel nennt man die subjektive Methode der Spiegelablesung, die zuletzt angeführte die objektive.

Ein Galvanometer, welches Einrichtung zur Spiegelablesung besitzt, nennt man ein Spiegelgalvanometer.

Eines der gebräuchlichsten Instrumente dieser Art ist das Spiegelgalvanometer von Sir William Thomson, welches wir in seinen wesentlichsten Teilen im Nachstehenden kurz beschreiben wollen.



Fig. 66. Ablesefernrohr mit Skala.



Fig. 67. Laterne mit Skala und Linse für objektive Beobachtungen an Spiegelgalvanometern.

In einem Kupfergehäuse hängt an einem Coconfaden ein kleiner Spiegel M, auf dessen Rückseite mehrere kleine Magnete n s aufgekittet sind. Diese kleinen Magnete hängen horizontal, wenn der Coconfaden durch das Gewicht des Spiegels gespannt wird. In das Kupfergehäuse werden zwei Röhren eingeschraubt, die innen jede eine ebene Spiegelplatte tragen. Dadurch werden die pendelnden





Fig. 67 a. Fig. 68.
Einrichtung des Thomson'schen Spiegelgalvanometers.

Schwingungen des Spiegels gedämpft, sodass er in jeder Lage fast augenblicklich zur Ruhe kommt. Wird der Spiegel nämlich abgelenkt, so drückt er die im inneren Raume der Messingröhre befindliche Luft auf der einen Seite zusammen, während auf der anderen Seite die Luft verdünnt wird. Auf diese Weise wird der Spiegel zwar nicht gehindert, sich in einem bestimmten Winkel einzustellen, wohl aber daran, mehrere Male hin und her zu schwingen. Ist die Dämpfung so vollkommen, dass der Spiegel sich unter dem Einfluss ablenkender Kräfte alsbald in die entsprechende Lage einstellt, ohne dabei über die neue Gleichgewichtslage hinaus zu schwingen, so sagt man, das Galvanometer ist »vollkommen aperiodisch.«

Die Windungen W umgeben das Kupfergehäuse, wie dies a deutungsweise die umstehende Abbildung Fig. 68 zeigt. T_1 u T_2 sind die beiden Klemmschrauben, durch die der zu messen Strom zu- und abgeführt wird. Zur Messung äusserst schwach Ströme benutzt man viele tausend Windungen von sehr dünne Drahte, für stärkere Ströme werden nur wenige Windungen dicker Drahtes benutzt.

Über dem Gehäuse befindet sich ein Magnet NS (Astasierung magnet genannt), den man nähern und entfernen und um ei Achse drehen kann. Dadurch kann einerseits das Magnetfeld d Erdmagnetismus je nach Bedarf geschwächt (astasiert) oder verstär werden, anderseits kann man durch Drehung des Magneten d Stellung des Spiegels verändern, sodass, so lange keine Ström durch die Windungen hindurchgehen, die Normale auf der Spiege ebene gerade nach dem Nullpunkte der Skala zeigt.

13. Das Torsionsgalvanometer von Siemens & Halske.

Dieses Instrument wird der Vielfältigkeit seiner Anwendunge wegen, und weil es sehr leicht zu handhaben ist, vielfach von de deutschen Elektrotechnikern, zumal zu Messungen der Potential differenz, aber auch zu Messungen der Stromstärke verwendet.[1])

Dasselbe besitzt einen Glockenmagnet, dessen Gestalt man au nebenstehender Fig. 69 ersehen kann. Dieser Magnet hängt a einem Bündel ungedrillter Seidenfäden zwische zwei rechteckigen, mit Drahtwindungen ver sehenen Holzrahmen. Oben trägt der Magne durch einen Messingstab a zwei Glimmerblättche g, g, die sich zwischen zwei festen, vom Gestell nach innen ragenden Messingblechen mm be wegen können. Durch diese Flügel werden di Schwingungen des Glockenmagneten rasch ge dämpft. An dem oberen Ende des Messing stäbchens a ist eine feine, cylindrische Spiral feder f befestigt, die oben mit einem vertikale Arme verbunden ist. Dieser Arm ist durc einen über dem Glasdeckel des Instrumente hervorragenden Torsionsknopf K um die Aufhängeachse des Ma neten drehbar. An dem Torsionsknopfe sitzt ein Zeiger Z, welch

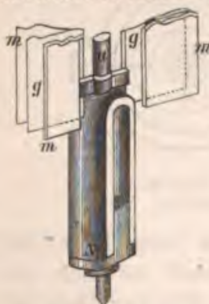


Fig. 69. Glockenmagnet des Torsionsgalvanometers.

[1]) Neuerdings werden mehr die Spannungs- und Strommesser von Westo und die Präzisions-Milli-Volt- und Milli-Ampèremeter von Siemens Halske und Anderen von den Praktikern bevorzugt, weil diese Instrume in jeder Lage benutzt werden können, und keiner besonders sorgsamen A stellung bedürfen.

auf eine, auf den gläsernen Deckel des Instrumentes eingeätzte Teilung zeigt.

An den Messingstab ist ferner ein leichter Zeiger *z* angesetzt, der auf den Nullpunkt der eben erwähnten Teilung von unten einspielen muss, wenn der Zeiger Z des Torsionsknopfes K ebenfalls auf Null steht und gleichzeitig die Verbindungslinie der Pole des Glockenmagneten im magnetischen Meridian, der Ebene der beiden Drahtrollenwindungen parallel steht. In diese Lage kann das Instrument, nachdem es durch Drehen der Fussschrauben vertikal gestellt worden ist, leicht gedreht werden, da die horizontale Grundplatte nach Lösen einer Klemm-

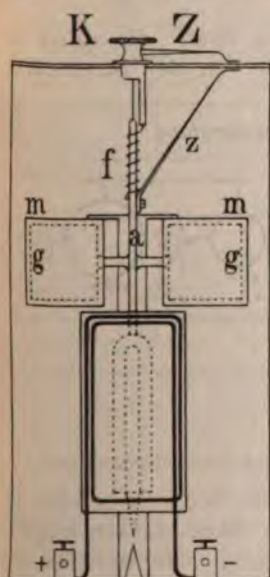


Fig. 70. Einrichtung des Torsionsgalvanometers.

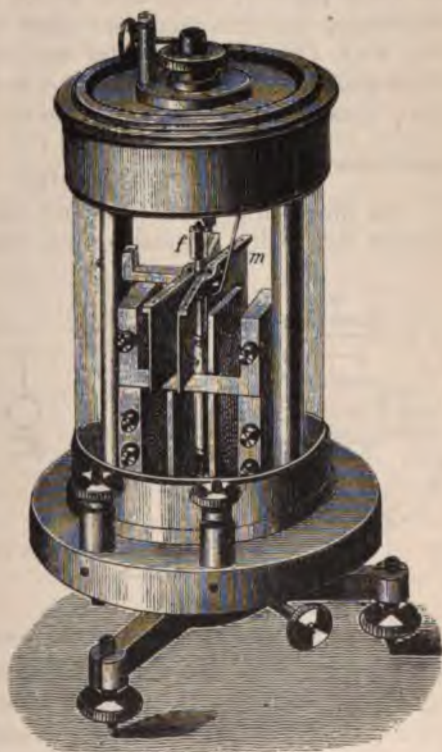


Fig. 71. Torsionsgalvanometer von Siemens & Halske.

schraube um eine vertikale Achse beweglich ist. Sendet man einen Strom durch die Windungen, so wird der Magnet aus dem magnetischen Meridian abgelenkt. Man dreht alsdann den Torsionsknopf *K* im entgegengesetzten Sinne so weit, bis der Magnet durch die der ablenkenden Wirkung des Stromes entgegengerichtete elastische Kraft der Feder f wieder in den Meridian und der mit ihm verbundene Zeiger z wieder auf Null zurückgeführt worden ist.

Der Winkel, um den die Feder zusammengedreht worden ist, wird aus der Stellung des mit dem Torsionsknopfe K verbundenen Zeigers Z abgelesen. Dieser Torsionswinkel ist der Stärke des durch die Windungen des Instrumentes fliessenden Stromes proportional.

Den beiden Windungen giebt man einen Gesamtwiderstand von genau 1 Ohm (oder gerade 100 Ohm) und fügt dem Instrumente noch einen Widerstandskasten mit Widerständen von 0, 9, 99, 999 Ohm (oder 0, 900, 9900, 99900 Ohm) bei, sodass der gesamte Widerstand des Galvanometers samt Zusatzwiderstand gerade 1, 10, 100, 1000 Ohm beträgt. Ist der Widerstand des Galvanometers selbst gleich 100 Ohm, so beträgt der Gesamtwiderstand dann 100, 1000, 10000, 100000 Ohm. Dadurch wird die Empfindlichkeit des Instrumentes $\frac{1}{1}, \frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}$.

Da die Grösse der ablenkend wirkenden Kraft, die durch die Torsion der Feder gemessen wird, nicht nur von der Stromstärke,

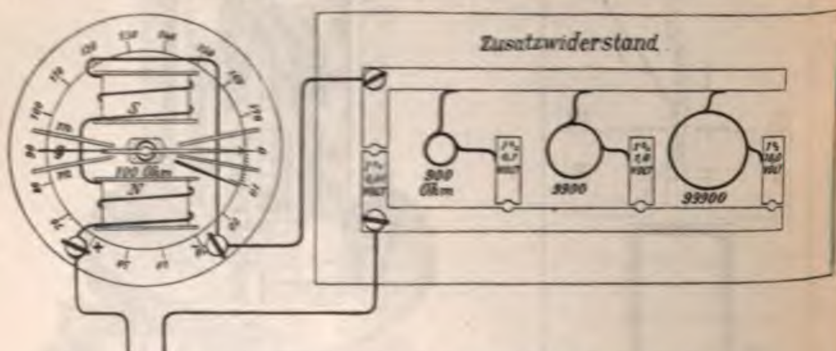


Fig. 72. Schaltung des Torsionsgalvanometers mit den Vorschaltwiderstand.

sondern auch vom magnetischen Moment des Glockenmagneten abhängig ist, darf das Instrument nicht in der Nähe starker magnetischer Felder gebraucht werden, ausserdem muss man dasselbe von Zeit zu Zeit durch Vergleich mit dem Silbervoltameter kontrollieren.

Zumeist wird das Torsionsgalvanometer benutzt, um Spannungen zu bestimmen; daher findet man auf dem Kasten, der die Zusatzwiderstände enthält, neben dem Stöpselloch gleich angegeben, welchem Spannungswerte 1° Torsionswinkel entspricht. (Vergl. Fig. 72.)

14. Differentialgalvanometer.

Um Ströme miteinander zu vergleichen, bedient man sich gelegentlich auch eines Galvanometers, auf dessen Spule zwei gleich

lange, getrennte Drähte nebeneinander aufgewickelt sind. Sendet man dann zwei gleich starke Ströme in entgegengesetzter Richtung durch diese beiden Windungen, so wird die Nadel durch diese Ströme nicht abgelenkt. Sind die Ströme jedoch ungleich, so wird die Nadel durch den stärkeren Strom mit der Differenz der Wirkungen beider Ströme abgelenkt.

15. Ballistisches Galvanometer.

Galvanometer mit grosser Schwingungsdauer des Magneten, also Instrumente mit langen, schweren Magneten und ohne Dämpfung, oder höchstens mit geringer Dämpfung, werden benutzt, wenn man die Elektrizitätsmengen bestimmen will, die durch sehr kurze Zeit dauernde Ströme (zumal rasch verlaufende Induktionsströme, Entladungsströme von Kondensatoren und dergl.) ausgeglichen werden. Da der Magnet infolge seines grossen Trägheitsmomentes sich nur langsam aus der Gleichgewichtslage entfernt, so summieren sich die verschiedenen Antriebe, welche der kurz dauernde Strom in den einzelnen Momenten seines Verlaufes dem Magneten erteilt. Alsdann ist der Sinus des halben Winkels des ersten Ausschlages der Nadel proportional der Elektrizitätsmenge, die durch die Windungen geflossen ist.[1])

16. Galvanometer mit beweglicher Spule. Spulengalvanometer.

Bei diesen in der Praxis sehr viel verbreiteten Galvanometern wird die Thatsache zur Messung von Stromstärken benutzt, dass eine vom zu messenden Strome durchflossene bewegliche Spule von rechteckiger Gestalt (C C in Fig. 73) sich mit ihrer Fläche senkrecht zur Richtung eines Magnetfeldes einzustellen sucht, das durch den Hufeisenmagnet AA und den dazwischen befindlichen Eisencylinder B gebildet wird. Die Spule CC strebt sich senkrecht zum Verlaufe der Kraftlinien des Magnetfeldes einzustellen, sodass die vom Strome in der Spule erzeugten Kraftlinien denjenigen des Feldes parallel werden. So lange die Spule CC stromlos ist, liegt ihre Ebene in der Richtung der Kraftlinien.

Bei diesen Galvanometern sind also die Magnete fest, und die vom Strome durchflossenen Spulen sind beweglich.

In der hier dargestellten Form eines solchen Instrumentes tritt der Strom durch die Klemme L über F und G bei E ein, bei D in die Windungen der beweglichen Spule C C über; bei J tritt der Strom in den Draht JH aus der Spule aus und gelangt von da durch die metallene Tragsäule zur Klemme K.

---

[1]) Über die Bestimmung der Konstanten des ballistischen Galvanometers und den Gebrauch dieses Instrumentes finden sich die näheren Mitteilungen in dem Kapitel: Über magnetische Messungen.

Die Spule CC mit daran befestigtem Spiegel J wird vom Drahte HJ getragen. Durch Anziehen der Schraube G kann dieser Draht, sowie der Draht DE mehr oder weniger gespannt werden.

Durch den oberhalb H befindlichen Torsionsknopf kann der Draht HJ, DE gedrillt und dadurch der Spule CC die richtige

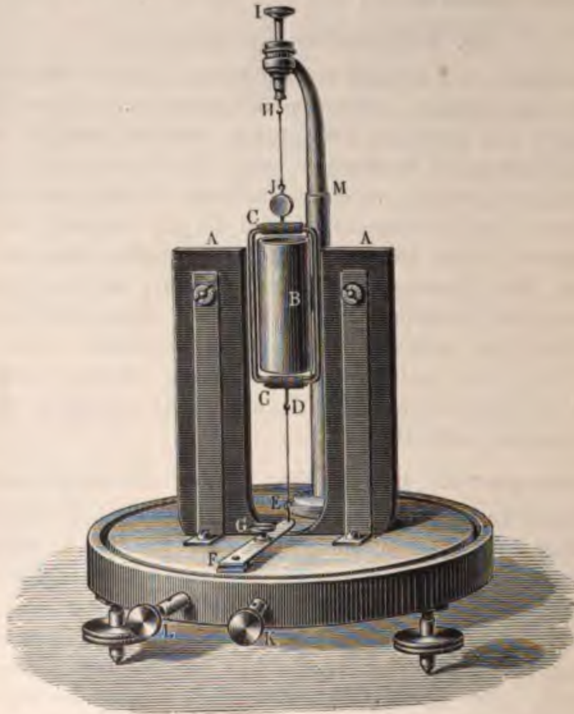


Fig. 73. D'Arsonval-Galvanometer mit beweglicher Spule.

Nulllage in der Richtung der Kraftlinien des Feldes des Dauermagneten AA gegeben werden.

Der weiche Eisenkörper B, um den sich die Spule CC, ohne ihn zu berühren, dreht, wird durch einen an die Metallsäule M angebrachten Arm getragen. Dieser Eisencylinder B hat den Zweck, die Kraftlinien zu konzentrieren und den magnetischen Widerstand des Kraftlinienweges zu verkleinern.

Wenn ausserdem noch an die Enden des Dauermagneten parallel zum Eisenkörper cylindrisch ausgebohrte Polschuhe aus weichem Eisen angesetzt werden, so entsteht ein nahezu gleichförmiges Kraft-

linienfeld, in dem sich die Spule CC bewegt. Nebenstehende Fig. 74 stellt dieses Feld dar.

Wenn ein Strom von der Stärke i durch die aus n Windungen bestehende Spule CC fliesst, entsteht ein Drehungsmoment $\mathfrak{H} \cdot f \cdot n \cdot i$, wenn man mit f den Inhalt der von der Spule umfassten Fläche, und mit $\mathfrak{H}$ die Feldstärke des vom Dauermagneten erzeugten Magnetfeldes versteht. — Die Spule dreht sich alsdann so lange, etwa um einen Winkel α, aus ihrer Gleichgewichtslage, bis das entstehende Drehungsmoment der elastischen Torsion $c \cdot \alpha$ der Drähte dem ersten Drehungsmoment das Gleichgewicht hält.

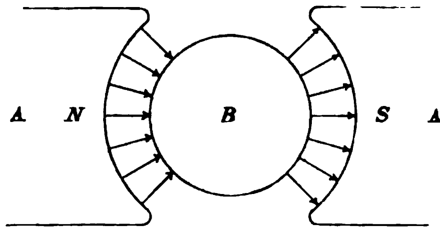


Fig. 74. Kraftlinienfeld beim d'Arsonval-Galvanometer.

Es ist demnach: $\mathfrak{H} \cdot f \cdot n \cdot i = c \cdot \alpha$
oder da $\mathfrak{H}$, f, n, c unveränderliche Werte sind,

$$i = \frac{c}{\mathfrak{H} \cdot f \cdot n} \cdot \alpha \text{ oder } i = K \cdot \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 23)$$

d. h. bei den Spulengalvanometern ist der Ausschlag der Stromstärke proportional.

Hat man durch eine vorgängige Messung einer anderweit bekannten Stromstärke mit dem Apparate die Instrumentenkonstante K ermittelt, so kann man aus dem Betrage des abgelesenen Winkels α jederzeit die gesuchte Stromstärke bestimmen.

Dies ist aber nicht der einzige grosse Vorteil dieser Instrumente. Die Wirkung des schwachen erdmagnetischen Feldes, mindestens aber dessen kleine Veränderungen durch benachbarte vagabondierende Ströme elektrischer Bahnen und ähnliche Störungen, kann im allgemeinen gegen das starke Feld des Dauermagneten vernachlässigt werden. Man kann das Spulengalvanometer daher auch in der Nachbarschaft stromdurchflossener Drähte oder in der Nähe von Magneten unbedenklich benutzen, zumal, wenn man die Konstante K, etwa mit dem Silbervoltameter, zuvor bei Aufstellung an der betreffenden Stelle neu bestimmt hat.

Da die Spule CC sich in einem kräftigen Magnetfelde bewegt, so stellt sich, wenn der Stromkreis des Galvanometers keinen ungewöhnlich hohen Widerstand hat, die Spule fast aperiodisch in die abgelenkte Stellung ein. Man kann deshalb ausserordentlich rasch an dem Apparate ablesen.

Die Abbildung Fig. 75 stellt ein Differentialgalvanometer von E. Gérard dar, das nach diesem Prinzipe gebaut ist. Die bewegliche Spule mit Spiegel steht oben in Verbindung mit einer Torsionsfeder, wie wir solche bereits bei anderen Instrumenten (z. B. beim Torsionsgalvanometer) kennen gelernt haben. Diese Feder dient gleichzeitig zur Abführung der Ströme. Die Spule besteht aus zwei völlig gleichen, getrennten Wickelungen, sodass man zwei entgegengesetzte Ströme gleichzeitig hindurch senden kann. Die Differenz der ablenkenden Wirkungen dieser beiden Ströme wird dann durch den Ausschlag der Spule gemessen. Die Zuführung des Stromes zu den beiden Wickelungen der Spule erfolgt von unten

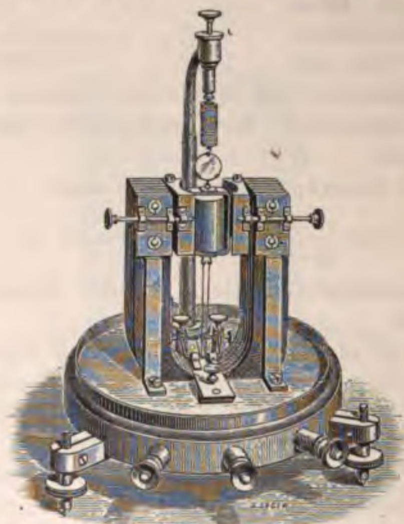


Fig. 75. Differential-Spulengalvanometer nach Gérard.

durch zwei in der Figur sichtbare Drähte, die mit den äusseren Klemmen des Apparates in Verbindung stehen.

Die Polschuhe aus weichem Eisen können bei diesem Instrument durch Mikrometerschrauben genähert oder entfernt werden.

Das Prinzip, welches dem Instrumente zu Grunde liegt, ist ein altes. Es wurde zuerst von Sir William Thomson (jetzt Lord Kelvin) bei seinem Kabelschreiber, an dem Siphon-Rekorder angewendet. Späterhin haben Deprez[1]) und d'Arsonval Galvanometer nach dem hier erläuterten Prinzip gebaut. Jetzt wird das Instrument vielfach nur d'Arsonval-Galvanometer genannt.

---

[1] Lumière électrique 1884, p. 401.

Späterhin hat Weston nach dem zu Grunde liegenden Gedanken handliche genaue Messinstrumente gebaut, bei welchen eine neue Lagerung der Achse der Spule und die Zu- und Abführung des Stromes durch Spiralfedern ohne merkliche elastische Nachwirkung zur Anwendung gebracht ist. (Vergl. die Mitteilung über die Weston-Instrumente in Kap. XI, Abschn. 7, a.)

Auf demselben Prinzip beruhen ferner die sogenannten Präzisionsmessinstrumente der Firma Siemens & Halske, sowie die Präzisions-Strom- und Spannungsmesser von Hartmann & Braun, der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co. und vieler anderer namhafter elektrotechnischer Fabriken. Die Milli-Volt- und Milli-Ampèremeter dieses Systems haben die früher so allgemein beliebten Torsionsgalvanometer für Strom- und Spannungsmessungen in vielen Laboratorien verdrängt. Eine genauere Beschreibung dieser neueren Instrumente findet man in Kap. XI, Abschn. 7.

VII. Kapitel.

Elektrodynamische Wirkungen der Ströme.

1. Anziehung und Abstossung paralleler und geneigter Ströme.

Da jeder Strom in dem ihn umgebenden Raume ein Kraftlinienfeld entwickelt, und die Kraftlinien an den Leitern haften, müssen auch vom Strome durchflossene Leiter anziehende oder abstossende Kräfte aufeinander ausüben. Man nennt diese Wirkungen elektrodynamische.

Aus den über die Eigenschaften magnetischer Kraftlinien mitgeteilten Sätzen lässt sich diese Thatsache leicht verstehen; man braucht nur zu berücksichtigen, dass die Kraftliniendichte mit zunehmender Entfernung von dem stromdurchflossenen Leiter abnimmt, und dass gleichgerichtete Kraftlinien sich abstossen und entgegengesetzt gerichtete sich anziehen.

Denken wir uns z. B., dass in Fig. 76 A_1 und A_2 die Durchschnitte durch zwei auf der Bildebene senkrechte Leiter sind, welche von gleichgerichteten (im vorliegenden Falle von dem vor der Bildebene gelegenen nach dem hinter derselben liegenden Raume gerichteten) Strömen durchflossen werden, so erkennt man sofort, dass die zwischen A_1 und A_2 gelegenen Kraftlinien entgegengesetzt sind und sich anziehen, die ausserhalb A_1 und A_2 gelegenen aber gleichgerichtet sind und sich abstossen. Gleichgerichtete parallele Ströme ziehen sich somit gegenseitig an.[1])

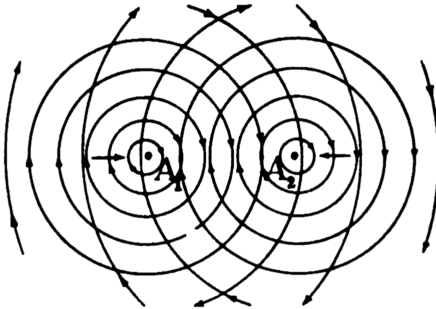


Fig. 76. Kraftlinien um gleichgerichtete parallele Sröme.

[1]) Die Windungen einer Spule ziehen sich somit gegenseitig an, wenn sie von einem Strome durchflossen werden. Man beweist dies bekanntlich durch den Versuch mit Roget's hüpfender Spirale.

In der nächsten Figur ist die Stromrichtung in dem Leiter A_1 dieselbe geblieben, die Stromrichtung in A_2 dagegen in die entgegengesetzte verkehrt worden. Nunmehr sind zwischen A_1 und A_2 die Kraftlinien gleichgerichtet und stossen sich ab, ausserhalb aber sind die Kraftlinien entgegengesetzt gerichtet und ziehen sich an. Entgegengesetzt gerichtete parallele Ströme stossen somit einander ab.

Aus derselben Betrachtungsweise folgt, dass Ströme, die gegeneinander geneigt sind, sich anziehen, wenn sie beide nach dem Scheitel des Winkels, den sie miteinander bilden, hin- oder beide von diesem wegfliessen, aber sich gegenseitig abstossen, wenn der eine Strom nach dem Winkelscheitel hin-, der andere von diesem wegfliesst (vergl. Fig. 78). Zwei sich im Raume kreuzende Ströme streben somit sich einander parallel zu stellen, sodass sie von den Strömen in derselben Richtung durchflossen werden.

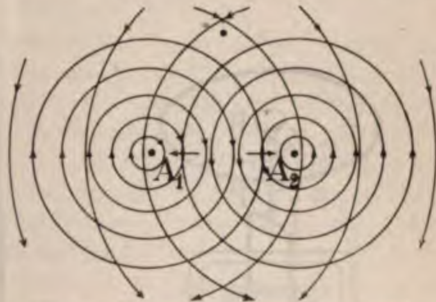


Fig. 77. Kraftlinien um entgegengesetzt gerichtete parallele Ströme.

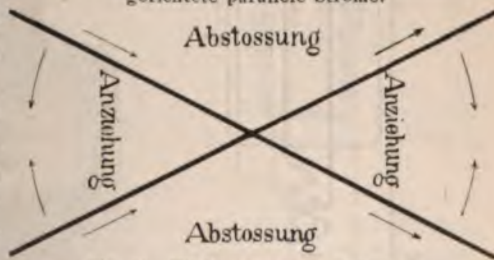


Fig. 78. Wirkung geneigter Ströme.

Diese Gesetze werden die Ampère'schen genannt, weil Ampère dieselben (im Jahre 1822) zuerst aufgestellt und durch zahlreiche sinnreiche Versuche bewiesen hat.

2. Das Elektrodynamometer.

Eine wichtige Anwendung von diesem Gesetze wird in dem von W. Weber zuerst konstruierten Elektrodynamometer gemacht. Siemens & Halske haben diesem Instrumente eine Form gegeben, in der es von den Elektrotechnikern vielfach zur Messung starker Ströme verwendet wird.

Ein aus einigen Windungen dicken Kupferdrahtes hergestelltes Solenoid A von länglich runder Gestalt ist an einem Holzgestell befestigt. (Vergl. Fig. 79 u. 80.) Um dieses Solenoid geht eine einzelne bewegliche, aus steifem Drahte hergestellte Windung W von ähnlicher Gestalt herum, die an einem Coconfaden und einer Torsionsfeder F

aufgehängt ist und mit ihren Enden in zwei in der Drehachse befindliche Quecksilbernäpfe B und C eintaucht. In der Ruhelage steht die Ebene der beweglichen Windung auf der Ebene der festen Windungen senkrecht.

Der Strom tritt durch die Klemme 2 oder 3 in die feststehenden Windungen ein, geht von da zu dem oberen Quecksilbernäpfchen B, durch die bewegliche Windung W hindurch zum unteren Quecksilbernäpfchen C und von da zur Klemme 1.

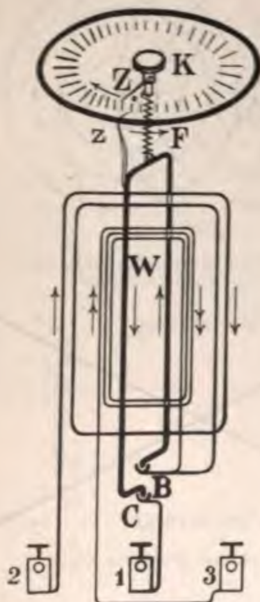


Fig. 79.
Einrichtung des Elektrodynamometers.

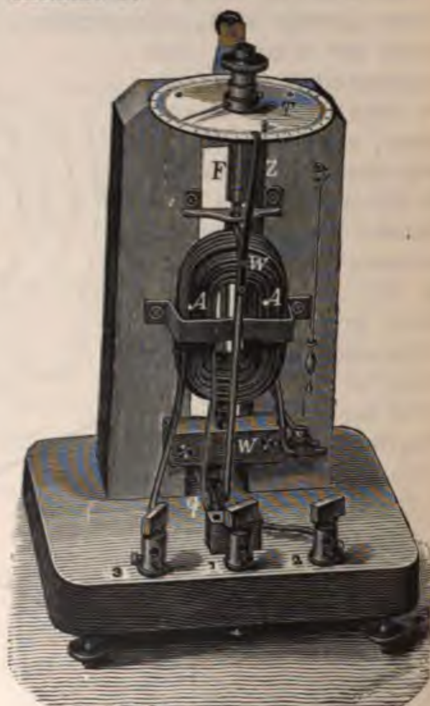


Fig. 80.
Elektrodynamometer von Siemens & Halske.

Nunmehr strebt die Ebene der beweglichen Windung W sich der Ebene der festen Windungen A parallel zu stellen. Diesem Bestreben aber wirkt man entgegen durch ein Zusammendrehen der elastischen Feder F, die einerseits an dem Knopfe K, anderseits an der beweglichen Windung W befestigt ist.

Hat man durch das Anspannen der Spiralfeder die bewegliche Windung in die Ruhelage zurückgebracht, so wird der Anziehungskraft, welche die feststehenden auf die beweglichen Windungen ausüben, durch die elastische Kraft der Feder F das Gleichgewicht

gehalten. Den Winkel, um den man die Feder gedreht hat, liest man an einer Skala ab, die sich unter dem mit einem Zeiger Z versehenen Knopfe K befindet. Um die Nullstellung der beweglichen Windung erkennen zu lassen, ist an diese ein Arm angelötet, der oben in eine auf die eben erwähnte Skala reichende Spitze z endet.

Da die ablenkend wirkende Kraft sowohl der Zahl der Kraftlinien proportional ist, die von der feststehenden, als der, die von der beweglichen Spule entwickelt wird, und beide Kraftlinienzahlen der Stromstärke i proportional sind, die durch beide Windungen fliesst, so ist: $i^2 = C \cdot \varphi$ oder $i = c \cdot \sqrt{\varphi}$,

wenn man mit $c = \sqrt{C}$ die Konstante des Instrumentes bezeichnet.

Die Instrumente von Siemens & Halske, deren äussere Erscheinung in Fig. 80 dargestellt ist, haben zwei feststehende Windungen, von denen die eine für Ströme von 5—15 A, die andere für solche zwischen 15 und 50 A gebraucht wird. Beide feste Windungen A enden einerseits an dem mit der Klemme 1 verbundenen Quecksilbernäpfchen C; die für schwächere Ströme bestimmte dünndrahtige Spule von grösserer Windungszahl endet anderseits in 3; die aus wenigen Windungen dickeren Drahtes bestehende feste Windung endet anderseits in der Klemme 2.

Der Reduktionsfaktor c des Instrumentes wird auf ähnliche Weise gefunden, wie wir dies bereits für die Tangentenbussole gezeigt haben. (Man vergl. Kap. VI, Abschn. 9, S. 141.)

Beispiel. An einem Elektrodynamometer, dessen Konstante c = 0,82 war, musste beim Durchgange des Stromes die Torsionsfeder um 175° zusammengedreht werden, um die bewegliche Windung in die Ruhelage zurückzubringen. Wie gross war die Stromstärke?

$$i = 0{,}82 \sqrt{175} = 0{,}82 \cdot 13{,}229 = 10{,}85 \text{ A.}$$

Das Dynamometer hat vor der Tangentenbussole den grossen Vorzug, dass es sowohl zur Messung von Strömen gleichbleibender Richtung, als auch zur Messung von Strömen mit rasch wechselnder Richtung (Wechselströmen) benutzt werden kann.

Da nämlich bei einem Wechsel der Stromrichtung der Strom in beiden Windungen sich gleichzeitig umkehrt, bleibt die anziehende Wirkung zwischen beiden Spulen bestehen. Bei einer Tangentenbussole oder einem anderen auf der Ablenkung einer Magnetnadel beruhenden Messinstrumente empfängt dagegen die Nadel von Strömen rasch umkehrender Richtung gleiche Antriebe nach entgegengesetzten Seiten hin auszuschlagen, und bleibt daher in ihrer Ruhelage stehen.

Misst man Gleichströme mit dem Elektrodynamometer, so empfiehlt es sich, um Einwirkungen des Erdmagnetismus auszuschliessen, die bewegliche Spule in eine Lage senkrecht zum magnetischen Meridian zu bringen.

Neuerdings werden die Elektrodynamometer meist mit e
Skala versehen, auf der die Wurzeln aus den Ablenkungen
getragen sind, an der man also unmittelbar die Grösse $\sqrt{\varphi}$ abl
kann.

3. Thomson's elektrodynamische Stromwage.

Während bei dem Elektrodynamometer von Siemens & Hal die feste und die bewegliche Spule vertikal stehen und der elek dynamischen Anziehung durch die elastische Gegenkraft einer Torsi feder das Gleichgewicht gehalten wird, sind bei der von Lord Kel (Sir William Thomson) konstruierten Stromwage[1]) an einem W balken zwei bewegliche Spulen horizontal angeordnet, die zwischen zwei ebenfalls horizontal liegenden Spulenpaaren bewe können. Sowohl die beiden beweglichen Spulen, als die bei festen Spulenpaare werden von dem zu messenden Strome du flossen und zwar in dem Sinne, dass die Wirkungen der festen Spulen die beiden an dem Wagebalken angebrachten bew lichen Spulen in demselben Sinne zu bewegen streben. Der Str lauf, beziehungsweise die Schaltung der Spulen, ist aus der stehenden Skizze (Fig. 81) ersichtlich. Man erkennt, dass die li

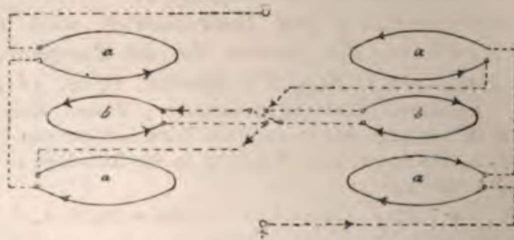


Fig. 81. Stromlauf bei der Stromwage von W. Thomson.

bewegliche Spule von der darunter befindlichen festen Spule abgestoss von der darüber befindlichen festen Spule aber angezogen wi während die rechte bewegliche Spule von der darunter gelege festen Spule angezogen, von der darüber gelegenen festen Sp abgestossen wird. Da der zu messende Strom die beiden bew lichen Spulen in entgegengesetztem Sinne durchfliesst, wird je Einfluss der Vertikalkomponente des Erdmagnetismus oder andere der Nähe des Apparates wirksamer magnetischer Kräfte aufgehob

Der Wagbalken hängt an einem äusserst biegsamen, aus vie dünnen Kupferdrähten gebildeten Bande, welches gleichzeitig Zuführung des Stromes dient. Ein ebensolches Band bewerkstell

[1]) Derartige Messinstrumente werden von James White in Glasgow gefertigt.

auch die Abnahme des Stromes aus den beweglichen Spulen. Da die Drähte dieser Bänder nackt sind und frei liegen, so können sie trotz ihres geringen Querschnittes mit verhältnismässig grossen

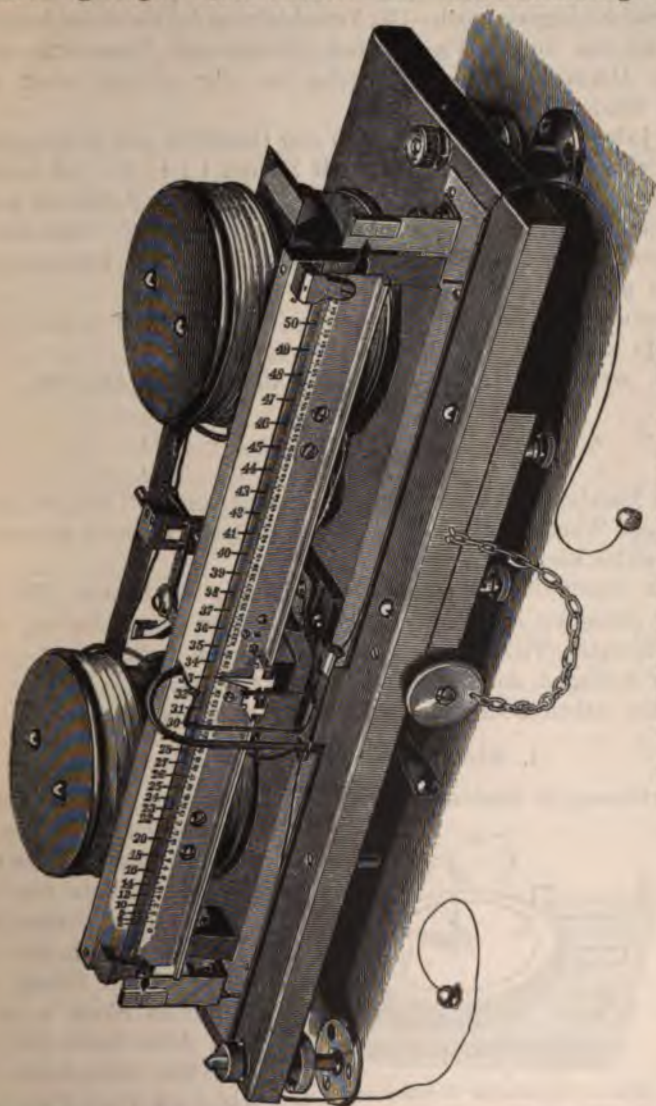


Fig. 82 W. Thomson's elektrodynamische Wage.

Stromstärken belastet werden. Die Spulen bestehen aus einer oder mehreren Windungen; für grössere Stromstärken sind sie aus mehreren voneinander isolierten, parallelen Drähten hergestellt. Die Grösse

der zwischen den feststehenden und beweglichen Spulen auftretenden elektrodynamischen Wirkungen wird durch Gewichte ermittelt, die längs des Wagebalkens so lange verschoben werden, bis er in seine Gleichgewichtslage einspielt. Die Verschiebung der Gewichte kann durch Ziehen an den in der Fig. 82 mit abgebildeten Schnuren erfolgen.

Die Ablesung erfolgt entweder an der oberen oder an der unteren Skala.

Zu jedem Instrumente gehören vier Gewichte und Gegengewichte, deren wirksame Grössen sich wie die Zahlen 1 : 4 : 16 : 64 verhalten. Das erste Paar bildet der in der Fig. 82 sichtbare Schlitten und sein Gegengewicht; beim zweiten Paare werden rechts und links die ersten Zusatzgewichte beigegeben; beim dritten Paare die zweiten Zusatzgewichte u. s. f. aufgelegt.

Einem Teilstriche der direkten Teilung, die von 0 bis 50 geht, entspricht z. B. bei der Dekaampèrewage,

wenn das	1.	Gewichtspaar	aufliegt,	0,25	Ampère
» »	2.	»	»	0,50	»
» »	3.	»	»	1,00	»
» »	4.	»	»	2,00	»

Der Messbereich dieser Wage geht somit von 0,25 bis 100 Ampère.

Solche Wagen werden in mehreren Grössen für sehr verschiedene Messbereiche hergestellt.

Man erhält die gemessene Stromstärke, wenn man die Wurzel aus der Ablesung an der unteren Skala oder die Ablesung an der oberen direkten Teilung mit einer Konstanten multipliziert.

Das Auflegen der Gewichte geschieht durch einen Hebel, dessen Griff links neben dem Arretierungsknopfe zu sehen ist.

4. Elektrodynamische Rotationen.

Fortdauernde Drehungen lassen sich zwischen zwei Teilen eines Stromes hervorbringen, wenn ein Teil des Stromes beweglich, der andere fest ist.



Fig. 83. Elektrodynamischer Rotationsapparat.

In dem nebenstehend (Fig. 83) gezeichneten Apparat steigt der Strom in der vertikalen Säule a auf und geht dann durch die beiden Teile des beweglichen Bügels b b' nach einer Quecksilberrinne hinab, die in die Oberfläche eines Metallstückes eingearbeitet ist. Von da geht der Strom durch das Metallstück zu einer dasselbe umgebenden Spule D.

Denkt man sich nun im horizontalen Stücke a b mit dem Strome schwimmend (den Kopf voran) und sieht den vom Solenoid erzeugten Pol (im vorliegenden Falle, weil die Ströme entgegengesetzt der Richtung des Uhrzeigers kreisen, einen Nordpol) an, so findet zwischen dem Pole und dem Strome eine Abstossung statt, die den Drahtbügel veranlasst (im vorliegenden Falle in der Richtung des Uhrzeigers) zu kreisen.

Selbstverständlich kann man das Solenoid auch durch einen Magneten oder noch besser durch einen Elektromagneten ersetzen.

Ebenso kann ein Magnetpol zur Rotation um einen Strom veranlasst werden, wenn man den Strom in der Mitte eines Magnetstabes ein- und durch beide Enden ableitet und den Magnet drehbar macht.

Wollte man den Strom durch ein Ende des Magneten ein- und zum anderen Ende ableiten, so würde der Magnetstab sich nicht drehen, da dann die beiden Pole nach entgegengesetzten Richtungen angetrieben werden würden.

Setzt man ein Metallgefäss, welches mit Quecksilber oder einer anderen Flüssigkeit gefüllt ist, auf den Pol eines Magneten und taucht das Ende eines Drahtes, der mit einer Stromquelle verbunden ist, in die Mitte dieser Flüssigkeit ein, während man das Gefäss mit dem anderen Pole der Stromquelle verbindet, so beginnt die Flüssigkeit zu rotieren.

Auf Grund dieser und ähnlicher elektrodynamischer Wirkungen sind neuerdings einige Vorrichtungen konstruiert worden, die dazu bestimmt sind, die innerhalb eines beliebigen Zeitraumes verbrauchte Strommenge zu messen.

VIII. Kapitel.

Die Induktionserscheinungen.

1. Das Wesen der Induktion.

Wir haben vorher im Eingange des V. Kapitels gesehen, dass jeder elektrische Strom, der einen Leiter durchfliesst, im umgebenden Raume ein Kraftlinienfeld hervorruft. Verschwindet der Strom, so schrumpfen die Kraftlinien zu unwirksamen Punkten zusammen. Steigt der Strom, so dehnt jede Kraftlinie sich aus, umfasst einen grösseren Flächenraum, und neue Kraftlinien drängen, den Raum dichter erfüllend, von dem Leiter als Mittelpunkt ausgehend, nach. Der Vorgang ist völlig umkehrbar.

Treten in dem Raume, der einen Leiter umgiebt, Änderungen in der Zahl oder in der Anordnung der Kraftlinien ein, so wird in dem Leiter eine E M K hervorgerufen.

Diese Vorgänge werden Induktionserscheinungen genannt. Auf welche Weise Änderungen im Kraftlinienfelde hervorgebracht werden, ob durch Verstärkung oder Schwächung, Näherung oder Entfernung benachbarter elektrischer Ströme oder Magnete, ist dabei nur von Einfluss auf die Stärke der Induktionserscheinungen und auf die Richtung, in welcher die geschiedenen Elektrizitätsmengen im Leiter bewegt werden. Ist der Leiter, auf welchen eine induzierende Wirkung ausgeübt wird, in sich geschlossen, so entsteht ein elektrischer Strom, Induktionsstrom genannt, der so lange dauert, als das Kraftlinienfeld in seiner Umgebung eine Änderung erfährt.

Die Induktion ist unabhängig von der Substanz und dem Querschnitte des Leiters und nur von der magnetischen Leitungsfähigkeit (Permeabilität) des den Leiter umgebenden Raumes abhängig.

2. Gesetze der Induktion.

Bewegt sich ein geradliniges Leiterstück von der Länge l mit einer Geschwindigkeit v durch ein Kraftlinienfeld, dessen Feldstärke an dieser Stelle $\mathfrak{H}$ ist, und ist der Winkel, den das Leiterstück l mit der positiven Richtung der Kraftlinien einschliesst, φ, und ist ferner der Winkel, den die Bewegungsrichtung des Leiters (die Geschwindig-

it v) mit der Normalen auf der durch l und die Kraftlinienrichtung stimmten Ebene einschliesst, ψ, so ist die in l induzierte elektrootorische Kraft E

$$E = l \cdot \mathfrak{H} \cdot v \cdot \sin \varphi \cdot \cos \psi \text{ absolute Einheiten.}$$

Da nun aber 10^8 absolute Einheiten gleich 1 Volt sind, so ist:

$$E = 10^{-8} \cdot l \cdot \mathfrak{H} \cdot v \cdot \sin \varphi \cdot \cos \psi \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Die induzierte EMK ist daher in jedem Augenblicke proportional der Intensität des Feldes, proportional der Geschwindigkeit der Bewegung, der Länge des Leiters, dem Sinus des Winkels, den der Leiter mit der Kraftlinienrichtung bildet, und proportional dem Cosinus des Winkels, den die Bewegungsrichtung des Leiters mit der auf Leiter und Kraftlinienrichtung gleichzeitig normalen Geraden bildet.

Man erkennt sofort, dass die induzierte EMK ihren grössten Wert erreicht, wenn $\varphi = 90$ und $\psi = 0$ ist, d. h. wenn das Leiterstück l auf den Kraftlinien senkrecht steht und in einer zu den Kraftlinien und der Richtung des Leiters senkrechten Richtung bewegt wird.

Die Induktion ist dagegen Null, wenn der Leiter mit der Richtung der Kraftlinien den Winkel Null einschliesst oder in der Richtung der Kraftlinien, seiner eigenen Richtung oder der durch diese beiden Richtungen bestimmten Ebene bewegt wird.

Aus den letzten Sätzen erkennt man sofort, dass keine Induktion stattfindet, wenn sich der Leiter so bewegt, dass keine Kraftlinien von demselben geschnitten werden.

Auch für die vorher aufgestellten Sätze lässt sich noch eine bequeme anderweite Deutung finden. Wir knüpfen zu dem Zwecke an die nebenstehende Fig. 84 an. In derselben befindet sich ein Leiterstück von der Länge AB = l in einem Kraftlinienfelde von der Feldstärke $\mathfrak{H}$. Dieses Leiterstück steht durch zwei induktionsfreie Leiterteile AD und BC mit einem ausserhalb des Kraftlinienfeldes befindlichen Drahte CD in Verbindung und bewegt sich senkrecht zur eigenen Richtung und zu der der Kraftlinien, wie dies der gefiederte Pfeil andeutet, mit der Geschwindigkeit v.

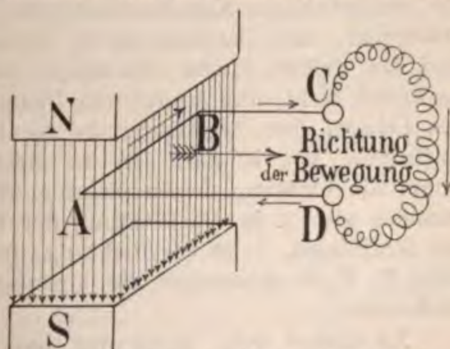


Fig. 84. Induktion in einem im Magnetfelde bewegten Leiter.

Im vorliegenden Falle ist die induzierte EMK:

$$E = l \cdot \mathfrak{H} \cdot v \text{ (absolute Einheiten)} = 10^{-8} \cdot l \cdot \mathfrak{H} \cdot v \text{ Volt.}$$

Man erkennt aber sofort, dass $l \cdot v$ die Fläche ist, die die Drähte CBAD in einer Sekunde überstrichen haben, und dass das Produkt aus dieser Fläche und der Zahl $\mathfrak{H}$ der die Flächeneinheit durchsetzenden Kraftlinien, gleich der Zahl der Kraftlinien ist, die das Drahtstück in der Zeiteinheit durchschnitten hat.

Man kann dieses Ergebnis in der Form aussprechen: *Die induzierte EMK ist gleich der Anzahl der Kraftlinien, welche vom Leiter in der Zeiteinheit durchkreuzt werden* (Faraday'sche Regel).

Obgleich dieser Satz zunächst nur für den Fall abgeleitet worden ist, in welchem $\varphi = 90$ und $\psi = 0$ war, erkennt man doch leicht, dass er auch im allgemeinen giltig sein muss. Es ist nämlich $l \cdot v \cdot \sin\varphi \cdot \cos\psi$ die Projektion der vom Leiter überstrichenen Fläche auf die zur Richtung der Kraftlinien normale Ebene. Das Produkt aus der Feldstärke und dem Inhalte dieser Flächenprojektion ist wiederum die Zahl der vom Leiter AB bei seiner Bewegung in der Zeiteinheit durchschnittenen Kraftlinien.

Für die Bestimmung der Richtung, in welcher der Strom induziert wird, ist das *Lenz'sche Gesetz* (1834) massgebend; dasselbe lautet: *Ändert sich in der Umgebung eines Leiters ein Kraftlinienfeld, so haben die in dem Leiter induzierten Ströme stets eine solche Richtung, dass sie der Änderung des Kraftlinienfeldes entgegen zu wirken suchen.*

Aus diesem Gesetze lässt sich leicht eine Gedächtnisregel ableiten. Bildet man aus den drei ersten Fingern der rechten Hand ein rechtwinkliges Koordinatensystem, indem man den Zeigefinger ausstreckt, den Daumen durch Ausspreizen senkrecht dazu stellt und den dritten Finger einschlägt, sodass er auf der Handfläche senkrecht steht, und bringt den Daumen in die Bewegungsrichtung des Leiters, den Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien (im Luftraume von N nach S), so giebt der eingeschlagene Mittelfinger die Richtung des induzierten Stromes an. (Die drei Finger kommen also 1. in die Richtung der Bewegung, 2. in die Richtung der Kraftlinien, 3. in die Richtung des Stromes; über die Reihenfolge B, K, S entscheidet die alphabetische Ordnung der Anfangsbuchstaben.)

Es bedarf wohl kaum der besonderen Erwähnung, dass es überall nur auf die relative Bewegung des Leiters zu den Kraftlinien ankommt, und dass man sich bei der Aufstellung der Gedächtnisregel die Kraftlinien ruhend und den Leiter als bewegt vorstellt.

Für den Fall, dass der Leiter fest steht, und die Kraftlinienzahl sich ändert (dergleichen kommt z. B. vor beim Induktionsapparat und bei den Transformatoren), hat Maxwell eine andere Form der Gedächtnisregel gegeben; dieselbe lautet folgendermassen: Blickt man in der Richtung der Kraftlinien (vom Nordpol zum Südpol) auf den Leiter, welcher die Kraftlinien umschliesst, so induziert eine Verminderung der Zahl der Kraftlinien, welche durch die umschlossene Fläche hindurchgehen, einen Strom, der diese Fläche in der Richtung des Uhrzeigers umkreist; eine Vermehrung der Zahl der Kraftlinien, die von dem Leiter umschlossen werden, induziert einen Strom, der entgegen der Richtung des Uhrzeigers den Leiter durchläuft (Maxwell'sche Regel).

3. Der induzierte Integralstrom.

Die Regeln, die im vorhergehenden Paragraphen mitgeteilt worden sind, entscheiden über die Richtung, in welcher die positive Elektrizität fliesst, und die Gesetze, welche aufgestellt wurden, bestimmen die Grösse der EMK, die in einem gegebenen sehr kurz dauernden Zeitabschnitt induziert wird. Man nennt diese Gesetze daher vielfach die Differentialgesetze.

Für viele praktische Fälle ist es aber von Wichtigkeit, die gesamte Elektrizitätsmenge kennen zu lernen, die während einer endlichen Zeit t den Leiter durchflossen hat, während eine bestimmte Bewegung vom Leiter vollzogen worden ist.

Wir zerlegen zu dem Zwecke den endlichen Zeitabschnitt von t Sekunden in eine so grosse Zahl sehr kleiner Zeiten $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \ldots$. dass die Geschwindigkeit, mit der die vom Leiter umschlossene Kraftlinienzahl während dieser kleinen Zeiträume τ sich ändert, als konstant angesehen werden kann. Bezeichnen wir die Zahl der Kraftlinien, die während einer Zeit τ_k in der vom Leiter eingeschlossenen Fläche aus- oder eintritt, mit z_k, so wird die in den einzelnen Zeiträumen τ induzierte EMK nach dem auf S. 166 ausgesprochenen Satze von Faraday:

$$e_1 = \frac{z_1}{\tau_1}; \; e_2 = \frac{z_2}{\tau_2}; \; e_3 = \frac{z_3}{\tau_3}; \; \ldots\ldots$$

Besitzt der Leiter, in welchem diese EMKräfte induziert werden, den Widerstand w, so fliessen in den einzelnen kleinen Zeitabschnitten im Leiter nach dem Ohm'schen Gesetz die Stromstärken:

$$i_1 = \frac{e_1}{w}; \; i_2 = \frac{e_2}{w}; \; i_3 = \frac{e_3}{w}; \; \ldots\ldots$$

Da nun die Stromstärken die Anzahl von Einheiten der Elektrizitätsmenge sind, die in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt

des Leiters hindurchfliessen, so ist die Elektrizitätsmenge ε_k, die in der Zeit τ_k, während der die Stromstärke i_k herrschte, durch w geflossen ist:

$$\varepsilon_k = i_k \cdot \tau_k = \frac{e_k}{w} \cdot \tau_k = \frac{z_k}{\tau_k \cdot w} \cdot \tau_k = \frac{z_k}{w}.$$

Nennt man nun E die gesamte Elektrizitätsmenge, die in der endlichen Zeit t durch den Leiter geflossen ist, so ist:

$$E = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \ldots\ldots = \frac{z_1}{w} + \frac{z_2}{w} + \frac{z_3}{w} + \ldots$$

$$= \frac{1}{w}(z_1 + z_2 + z_3 + \ldots)$$

Die Summe $z_1 + z_2 + z_3 + \ldots\ldots$ ist die Summe Z der sämtlichen Kraftlinien, die in dem Zeitraume t in der vom Leiter umschlossenen Fläche aus- oder eingetreten sind; man erhält somit:

$$E = \frac{Z}{w} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Die gesamte Elektrizitätsmenge E, die in der ganzen Zeit t durch den Leiter geflossen ist, nennt man den Integralstrom. Man erkennt, dass E von der Zeit t ganz unabhängig und nur von der gesamten Anzahl der Kraftlinien Z abhängt, die in der vom Leiter umschlossenen Fläche aus- oder eingetreten ist.

Die Grösse $\frac{Z}{t}$ ist die mittlere EMK der Induktion während des Zeitraumes t.

4. Ein in sich geschlossener Leiter dreht sich in einem gleichförmigen Kraftlinienfelde. Wechselstrom.

Stellen wir uns vor, aus einem Kupferdrahte sei ein Quadrat von dem Inhalte F gebildet, und dieses Quadrat drehe sich gleichförmig in einem gleichförmigen Kraftlinienfelde um eine Achse A, welche auf der Richtung der Kraftlinien senkrecht steht (vergl. Fig. 85).[1] Die Kraftliniendichte (Zahl der Kraftlinien in 1 *qcm* Fläche senkrecht zu ihrer Richtung) sei $\mathfrak{B}$.

Braucht das Quadrat T Sekunden zu einem Umlaufe von 360° oder um 2π, und ist n die Zahl der Umdrehungen in 1 Sekunde, so ist

$$T \cdot n = 1, \text{ oder } T = \frac{1}{n} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Nehmen wir an, es seien t Sekunden nötig, um den Winkel α

[1]) In der Figur erscheint das Quadrat als gerade Linie, weil seine Fläche auf der Papierebene senkrecht steht. Die Pfeile geben die Stromrichtung in der dem Beschauer zugewendeten Quadratseite an.

ückzulegen, so gilt, da gleichförmige Drehung vorausgesetzt wird, Proportion $\frac{2\pi}{T} = \frac{a}{t}$, oder $a = \frac{2\pi \cdot t}{T}$ . . . . 4)

In der Stellung der Fläche unter dem Winkel a gehen $F \cdot \mathfrak{B} \cdot \cos a$ raftlinien durch die Fläche hindurch.

Denken wir uns nun in der Zeit τ den Winkel a um einen sehr leinen Winkel δ wachsend, so ist am Ende der Zeit $t + \tau$ die Kraftinienzahl:

$$F \cdot \mathfrak{B} \cdot \cos(a + \delta) = F \cdot \mathfrak{B} \cos a \cdot \cos \delta - F \cdot \mathfrak{B} \cdot \sin a \cdot \sin \delta.$$

Fig. 85. Induktion in einem im Kraftlinienfelde rotierenden Quadrate.

Da man nun aber den Cosinus eines sehr kleinen Winkels gleich 1 setzen, und den Sinus eines sehr kleinen Winkels mit dem Bogen vertauschen kann, so ist:

$$F \cdot \mathfrak{B} \cdot \cos(a + \delta) = F \cdot \mathfrak{B} \cdot \cos a - F \cdot \mathfrak{B} \cdot \sin a \cdot \delta.$$

Nach der obigen Gleichung 4) gilt aber auch:

$$\frac{2\pi}{T} = \frac{\delta}{\tau}, \text{ oder } \delta = \frac{2\pi \cdot \tau}{T}.$$

Die Kraftlinienzahl ändert sich demnach in der Zeit τ um $\frac{2\pi \cdot \tau}{T} F \cdot \mathfrak{B} \cdot \sin a$ und die induzierte EMK ist: Änderung der raftlinienzahl, dividiert durch die Zeit, während der die Änderung folgt, oder:

$$EMK = \frac{2\pi \cdot \tau \cdot F \cdot \mathfrak{B} \cdot \sin a}{T \cdot \tau} = \frac{2\pi}{T} \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot \sin a \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Sehen wir in der Richtung der Kraftlinien auf die Fläche, so uss, da die Kraftlinienzahl bei der Bewegung im I. Quadranten

abnimmt, der induzierte Strom in der Richtung des Uhrzeigers die Fläche umkreisen. Auf der dem Beschauer zugewendeten Seite des rotierenden Quadrates fliesst somit im I. Quadranten der Drehung der Strom von der Achse A weg (centrifugal).

Wir betrachten nun die Grösse und Richtung der induzierten Ströme in folgenden 8 Stellungen:

Winkel	Die Kraftlinienzahl	Die EMK in der Kraftlinienrichtung betrachtet, ist	Der Strom ist
0°	ist ein Maximum	Null	Null
α°	nimmt ab	wirkt im Sinne des Uhrzeigers	centrifugal gerichtet
90°	Null	desgl.	centrifugal gerichtet
90 + α°	nimmt zu	wirkt entgegengesetzt dem Uhrzeiger	centrifugal gerichtet
180°	ist ein Maximum	Null	Null
180 + α°	nimmt ab	wirkt im Sinne des Uhrzeigers	centripetal gerichtet
270°	Null	wirkt im Sinne des Uhrzeigers	centripetal gerichtet
270 + α°	nimmt zu	wirkt entgegengesetzt der Richtung des Uhrzeigers	centripetal gerichtet
360°	ist ein Maximum	Null	Null

Wir erkennen, dass der Strom bei jedem ganzen Umlaufe des Leiters um die Achse zweimal Null wird, wenn er durch die Stellungen hindurch geht, in welchen die vom Leiter umgebene Fläche senkrecht auf der Kraftlinienrichtung steht, und dass im ersten und zweiten Quadranten der Bewegung der Strom, in dem einen durch den Pfeil angedeuteten Sinne, und im dritten und vierten Quadranten in entgegengesetzter Richtung die Fläche umkreist (negativ wird).

Die beiden um 180° auseinander liegenden Stellungen, in welchen der Strom sein Vorzeichen ändert, nennen wir die neutrale Zone.

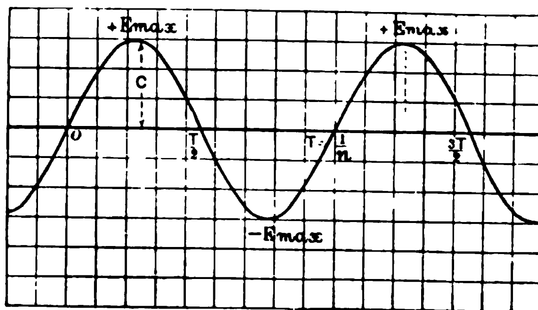


Fig. 86. Änderung der EMK in einem Draht-Quadrate bei Drehung in einem gleichförmigen Kraftlinienfelde.

Tragen wir jetzt die Zeiten t als Abscissen und die induzierten EMK für jede Stellung als Ordinaten auf, so erhalten wir eine Wellenlinie, wie solche Fig. 86 darstellt.

In dem um die Achse rotierenden geschlossenen Leiter wird somit ein Strom induziert, der mit der Stärke Null beginnt, hierauf bis zu einem gewissen Höchstwerte anwächst, dann dieselbe Zeit hindurch bis zu Null wieder abnimmt, nunmehr seine Richtung wechselt und bis zu einem negativen Maximum von gleicher Grösse anwächst und wieder zu Null abnimmt u. s. f. Ein solcher Strom wird ein »Wechselstrom« genannt.

Der Drehung eines Leiters in einem magnetischen Felde stellt sich ein gewisser Widerstand entgegen; um diesen Widerstand zu überwinden, ist eine gewisse Arbeitsleistung nötig. Diese Arbeit ist gleich der Summe der elektrischen Arbeiten (i · E), die in den einzelnen Augenblicken der Drehung durch die Induktion im Leiter geleistet werden.

Nennt man u die Anzahl der Umdrehungen, die in einer Minute erfolgen, so ist: $n = \frac{u}{60}$ und $T = \frac{60}{u}$. Setzt man diesen Wert ein, und nimmt man statt einer Windung, die die Fläche F umschliesst, deren m an, so erhält man:

$$EMK = \frac{2\pi m \cdot u}{60} \cdot \mathfrak{B} \cdot F \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

$$= \frac{2\pi m \cdot u}{60 \cdot 10^8} \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Benutzt man nicht absolute Einheiten, sondern Volt als Mass der EMK, so muss man noch durch 10^8 dividieren.

Beispiel. Eine aus 50 Windungen bestehende kreisförmige Spule von 40 *cm* Durchmesser werde in einer Minute 1200 mal um eine vertikale Achse gedreht. Das horizontale Feld des Erdmagnetismus wirke mit einer Stärke von 0,2 absoluten Einheiten auf diese Spule. Wie gross ist das Maximum der durch den Erdmagnetismus induzierten EMK?

Das Maximum der EMK entspricht dem Werte $\sin 2\pi \frac{T}{t} = 1$, somit ist:

$$E_{max} = \frac{2\pi m \cdot u}{60 \cdot 10^8} \cdot \mathfrak{B} \cdot F.$$

Hierin ist nach der Aufgabe $u = 1200$, $m = 50$, $\mathfrak{B} = 0{,}2$,

$$F = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{40^2 \cdot \pi}{4} = 1256{,}6 \text{ } qcm,$$

somit:

$$E_{max} = \frac{2\pi \cdot 20 \cdot 50 \cdot 0{,}2 \cdot 1256{,}6}{10^8} = 0{,}0158 \text{ V}.$$

5. Gegenseitige Induktion.

Wächst in einem Leiter die Stromstärke in einer Sekunde um die Einheit, so wird in jedem benachbarten Leiter durch die Änderung des ihn umgebenden Kraftlinienfeldes eine EMK induziert; man nennt diese EMK den Koëffizienten der gegenseitigen Induktion der beiden Leiter.

Sind zwei Drähte von der Länge l in einem Abstande d voneinander geradlinig ausgespannt, so ist der Koëffizient M der gegenseitigen Induktion:

$$M = -2l \cdot \left(\log \text{nat} \frac{2l}{d} + 1\right) \quad . \; . \; . \; . \quad 7)$$

Wenn auf einen Cylinder zwei einfache Drahtlagen von der Länge l mit den Windungszahlen n_1 und n_2 (auf die Längeneinheit bezogen) aufgewickelt sind, so ist:

$$M = 4\pi n_1 \cdot n_2 \cdot F \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

sofern F die von jeder Windung umschlossene Fläche ist.

Der Koëffizient der gegenseitigen Induktion zweier 1 *cm* langer Spulen von n_1 und n_2 Windungen auf jedes Centimeter Länge, die auf Cylindern vom Radius r_1 und r_2 mit je einer Dicke d_1 und d_2 übereinander gewickelt sind, ist:

$$M = 4\pi^2 n_1^2 n_2^2 l\, d_1\, d_2\, r_1^2 \left(1 + \frac{d_1}{r_1} + \frac{d_1^2}{3 r_1^2}\right) \quad . \; . \quad 9)$$

Enthält die Spule noch einen weichen Eisenkern vom Radius a, so kommt in der Klammer noch ein Glied $+ 4\pi \varkappa a^2$ hinzu, in dem $\varkappa$ die Suszeptibilität des weichen Eisens bedeutet (vergl. Kap. V, Abschn. 15, S. 114). Dieses Glied übertrifft dann an Grösse die übrigen erheblich.

Ist d gegen r klein, d. h. hat man nur wenige Drahtlagen übereinander gelegt, so können die Glieder $\frac{d_1}{r_1}$ und $\frac{d_1^2}{3 r_1^2}$ weggelassen werden, und man kann annäherungsweise

$$M = 4\pi^2 \cdot \mu\, n_1^2 n_2^2 l\, d_1\, d_2\, a^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 10)$$

setzen.

6. Selbstinduktion.

Jeder von einem Strome durchflossene Leiter befindet sich in dem von ihm selbst erzeugten Kraftlinienfelde. Jede Änderung des Stromes bewirkt eine Änderung im Kraftfelde; jede Änderung der Kraftlinien wirkt induzierend auf den Leiter zurück. Die auf diese Weise entstehenden Induktionsvorgänge fasst man unter dem Namen »Selbstinduktion« zusammen; die so erzeugten Ströme nennt man »Extraströme.«

Nach dem Lenz'schen Gesetze setzt die Induktionswirkung der Änderung des Kraftfeldes einen Widerstand entgegen. Der Öffnungsextrastrom ist daher dem verschwindenden Hauptstrom gleich gerichtet und verzögert sein Verschwinden; der Schliessungsextrastrom ist dem entstehenden Strome entgegengesetzt gerichtet und verzögert den Eintritt der vollen Stromstärke.

Die Selbstinduktion wirkt ähnlich wie ein Widerstand; bei Dynamomaschinen macht sie sich als eine scheinbare Vergrösserung des Ankerwiderstandes bemerkbar; von noch grösserer Wichtigkeit ist sie bei Wechselstrommaschinen und Transformatoren. Besonders stark wird die Selbstinduktion, wenn der Leiter Windungen besitzt. Alsdann werden die Kraftlinien, welche eine Windung erzeugt, in die Fläche anderer Windungen hineinragen. Wesentlich stärker werden die Erscheinungen auftreten, wenn sich Eisen in der Nähe der Leiter, zumal innerhalb der Windungen einer vom Strome durchflossenen Spule, befindet, weil ja im Eisen ausserordentlich viel mehr Kraftlinien erzeugt werden, als in der Luft oder im Kupfer.

Die Windungen von Elektromagneten besitzen daher grosse Selbstinduktion.

7. Koëffizient der Selbstinduktion.

Jeder Stromleiter besitzt einen Koëffizient der Selbstinduktion; es ist dies die EMK, welche induziert wird, wenn die Stromstärke in diesem Leiter in der Zeiteinheit um 1 wächst. Der Koëffizient der Selbstinduktion hängt ab von der Form des Leiters, von der Permeabilität seines Materiales für magnetische Kraftlinien und der Grösse, Nähe und Gestalt magnetisierbarer Massen (Eisen), die sich in dem den Leiter umgebenden Raume befinden.

Mit der Berechnung des Koëffizienten der Selbstinduktion können wir uns hier nicht aufhalten; wir wollen nur bei einigen für die Praxis besonders wichtigen Fällen die Grösse desselben mitteilen. Wir bezeichnen allgemein den Koëffizienten mit L.[1])

Für einen fern von allen anderen Leitern und von Eisenmassen frei in der Luft ausgespannten Draht von der Länge l und der Dicke d ist:

$$L = -2\,l \cdot \left(\log \text{nat} \frac{4\,l}{d} - 1 + \frac{\mu}{4}\right) \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

Hier ist μ die schon früher (vergl. Kap. V, Abschn. 15, S. 113) erwähnte magnetische Permeabilität des Materiales, aus dem der Draht hergestellt ist.

Da μ für Eisen sehr merkliche Werte besitzt, folgt daraus, dass Eisendrähte der Leitung oft unterbrochener (Telegraphenströme) oder Wechselströme (Telephonströme) einen merklich grösseren, scheinbaren Widerstand entgegensetzen, als Drähte, die aus nichtmagnetischem Materiale (Kupfer, Bronze) hergestellt sind.

Für eine lange Spule, die in eine einzige Lage angeordnet auf jedes Centimeter Länge n Windungen enthält, deren jede die Fläche F

---

[1]) Sind alle Masse in cm ausgedrückt, so erhält man auch L in cm. Um L in praktischen Einheiten, Quadrant oder Henry, zu erhalten, müssen die Zahlen mit 10^9 dividiert werden. Vergl. Kap. IX, Abschn. 6.

umschliesst, ist (man braucht nur in Formel 8) $n_1 = n_2 = n$ zu setzen):

$$L = 4\pi n^2 \cdot F \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Sind bei einer langen Spule mehrere Lagen übereinander gewickelt, sodass der Radius der innersten Lage r, der der äussersten $r + d$ ist, so ergiebt sich:

$$L = 4\pi^2 n^4 l d^2 r^2 \cdot \left(1 + \frac{d}{r} + \frac{d^2}{3 r^2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

Enthält die Spule noch einen weichen Eisenkern von der Dicke a, so ist:

$$L = 4\pi^2 n^4 l d^2 r^2 \cdot \left(1 + 4\pi \varkappa \frac{a^2}{r^2} + \frac{d}{r} + \frac{d^2}{3 r^2}\right) \quad . \quad 14)$$

Hierin hat $\varkappa$ die früher (Kap. V, Abschn. 14, S. 113) erwähnte Bedeutung; es bezeichnet die magnetische Suszeptibilität des Eisens, und das $\varkappa$ enthaltende Glied ist alsdann das weitaus grösste in der Klammer. Wegen der Unsicherheit des Mittelwertes von $\varkappa$ kann L für Elektromagnete nur experimentell ermittelt werden.

Nicht zu lange, geradlinig ausgespannte Kupferdrähte oder bifilar[1]) gewickelte Spulen können in erster Annäherung als frei von Selbstinduktion bezeichnet werden.

Bedeutet L den Koëffizienten der Selbstinduktion eines Leiters und R den Widerstand desselben, so ist der scheinbare Widerstand R', der sich dem Durchgange eines Wechselstromes von $\sim$ vollständigen Wellen (in 1 Sekunde) entgegenstellt:

$$R' = \sqrt{R^2 + (2 \sim \pi L)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

8. Durchgang eines Wechselstromes durch einen Leiter mit Selbstinduktion.

Man erkennt, dass für unveränderliche Ströme die Selbstinduktion ohne Bedeutung ist und sich nur beim Schliessen und Öffnen bemerkbar macht. Anders liegt die Sache bei Wechselströmen, wie wir einen solchen im 4. Abschnitte dieses Kapitels in einem geschlossenen, in einem durchaus gleichförmigen Kraftlinienfelde sich drehenden Leiter entstehen sahen. Wir setzen voraus: Auf einen Leiter, dessen Widerstand R Ohm beträgt und der einen Selbstinduktions-Koëffizienten L besitzt, wirke eine EMK, die sich nach der Formel

$$E = E_{max} \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

periodisch ändert, wobei T die Dauer einer vollständigen Periode in Sekunden ist.

---

[1]) Widerstandsspulen werden zumeist bifilar gewickelt, damit sie keine magnetischen Felder entwickeln, die auf benachbarte Messinstrumente störend einwirken können. Man legt zu dem Zwecke den aufzuwindenden Draht in der Mitte zusammen und wickelt beide Hälften gleichzeitig auf.

Hätte der Leiter keine Selbstinduktion, so würde der Strom
n Wert haben:

$$i = \frac{E}{R} = \frac{E_{max}}{R} \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad \ldots\ldots 16)$$

Da der Leiter aber einen Selbstinduktions-Koëffizienten L be-
tzt, wird:

$$i = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2 L^2}{T^2}}} \cdot \sin 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \varphi\right) \quad \ldots 17)$$

wobei die neu in der Formel auftretende Grösse φ durch die Gleichung

$$\tan 2\pi\varphi = \frac{2\pi \sim L}{R} \quad \ldots\ldots\ldots 18)$$

definiert wird.

Wenn man den Ausdruck für i in Gleichung 17 mit dem in Gleichung 16 vergleicht, erkennt man sofort, dass durch die Selbstinduktion einesteils die Stromstärke geschwächt wird und andernteils der Eintritt des Maximums und Minimums der Stromstärke nicht mehr zu derselben Zeit stattfindet, zu der die EMK den höchsten positiven oder negativen Wert erreicht, sondern verzögert wird. Die Grösse φ misst die Verzögerung und heisst die **Phasenverschiebung**.

In der nachstehenden Fig. 87 stellt die Wellenlinie 1 den Wechselstrom dar, den die periodisch schwankende EMK in einem Leiter



Fig. 87. Phasenverschiebung eines Wechselstromes durch Selbstinduktion.

vom Widerstande R ohne Selbstinduktion hervorbringen würde, während die Wellenlinie 2 den Wechselstrom darstellt, der entsteht, wenn der Leiter ausserdem erhebliche Selbstinduktion besitzt.

Beispiel: Ein Telephonstrom, der in einer Sekunde 1000 Wellen erzeugt, geht durch eine Spule hindurch, deren Widerstand 50 ω und deren Koëffizient der Selbstinduktion L = 0,6 Henry [1]) beträgt.

Dann ist der scheinbare Widerstand der Spule:

$$\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2 \cdot L^2}{T^2}} = \sqrt{50^2 + \frac{4\pi^2 \cdot 0{,}6^2}{\frac{1}{1000^2}}}$$

$$= \sqrt{2500 + 4 \cdot \pi^2 \cdot 0{,}36 \cdot 1\,000\,000} = 3770,$$

so über 75 mal so gross, als der wahre Widerstand (50 ω).

[1]) Hinsichtlich der Definition von 1 Henry vergl. Kap. IX, Abschn. 6.

9. Induktion in massiven Metallmassen, Foucaultströme.

Induktionserscheinungen werden nicht nur in Drähten hervorgerufen, sondern auch in Metallmassen jeder Art, in deren Nähe sich Änderungen eines Kraftlinienfeldes vollziehen. Bewegt man eine Metallmasse in einem Kraftlinienfelde, so entstehen in dem Metalle, gemäss dem Lenz'schen Gesetze, Induktionsströme, die sich der Bewegung entgegensetzen. Bei der Annäherung eines Metallkörpers an den Pol eines Elektromagneten entstehen z. B. Ströme, die denjenigen, die den Pol erzeugt haben, entgegengesetzt gerichtet sind und daher abgestossen werden. Entfernt sich hingegen ein Metallstück von dem Magnetpole, so werden gleichgerichtete Ströme induziert, die von denjenigen, welche den Pol umkreisen, angezogen werden.

Der Bewegung eines Metallstückes in einem Kraftlinienfelde setzt sich infolge dieser Induktionsvorgänge ein Widerstand entgegen, zu dessen Überwindung eine gewisse Arbeitsleistung erforderlich ist. Da der Leitungswiderstand in massiven Metallmassen sehr klein ist, sind die Ströme, die in denselben induziert werden, sehr stark. Das Metall wird durch diese Ströme erwärmt. Man nennt solche Ströme »Foucaultströme« oder »Wirbelströme«. Wenn sich ein Magnet in der Nähe einer Metallmasse bewegt, so rufen die in die Metallmasse ein- und von ihr austretenden Kraftlinien in derselben Induktionsströme hervor, die der Bewegung des Magneten entgegenwirken. Der Magnet bewegt sich in der Nähe von Metallmassen, ähnlich als ob er in eine zähe Flüssigkeit eingetaucht wäre. Man benutzt dies vielfach, um bei Messinstrumenten die Schwingungen von Magnetnadeln rasch zu dämpfen. Man umgiebt zu diesem Zwecke den Magneten möglichst dicht mit einem Kupfergehäuse, sodass gerade nur Raum genug bleibt, damit die Ablenkungen des Magneten sich ungestört vollziehen können. Man kann es auf diese Weise erreichen, dass die Magnetnadel sich unter der Einwirkung einer ablenkenden Kraft in die neue Gleichgewichtslage einstellt, ohne über dieselbe hinaus zu schwingen (aperiodische Galvanometer).

Auch die Schwingungen der in einem Magnetfelde sich bewegenden Spulen der Spulengalvanometer werden durch solche Induktionsvorgänge stark gedämpft.

Um dem Entstehen von Foucaultströmen vorzubeugen, und die durch dieselbe veranlasste Erwärmung und den Verlust an Arbeit zu vermeiden, müssen Metallmassen, in deren Nähe sich Änderungen von Kraftlinienfeldern vollziehen, in der Richtung, in welcher Foucaultströme entstehen würden, in Teile zerlegt und diese Teile durch isolierende Zwischenschichten voneinander getrennt werden.

Den Eisenkern eines Elektromagneten, dessen Windungen von Wechselströmen oder häufig unterbrochenen Strömen durchflossen werden, bildet man daher aus dünnen Eisendrähten, die man durch eine Lackschicht voneinander isoliert. Die Foucaultströme, die parallel den Windungen des Elektromagneten im Eisenkerne auftreten würden, können dann nicht zu stande kommen. Da die Eisendrähte aber durch Wechselströme abwechselnd in entgegengesetztem Sinne magnetisiert werden, so entsteht ein Energieverlust infolge der früher (Kap. V, Abschn. 17, S. 123) erwähnten Hysteresis und eine diesem Verluste entsprechende Erwärmung der Eisendrähte.

Die Eisenmasse, welche in dem Anker einer Dynamomaschine enthalten ist, muss in der Richtung, die zu den stromführenden Drähten senkrecht ist, ebenfalls geteilt, und die Teile müssen voneinander isoliert werden, damit nicht ein Arbeitsverlust und schädliche Erwärmung durch Foucaultströme veranlasst wird.

Ebenso müssen Metallhülsen, in deren Inneren Eisendrahtbündel oder Eisenkörper abwechselnden Magnetisierungen unterworfen werden, längs der Achse geschlitzt werden.

IX. Kapitel.

Das absolute Masssystem.

1. Die Grundeinheiten des absoluten Masssystems.

Jede Grösse kann nur durch eine ihr gleichartige andere Grösse gemessen werden. Alle physikalischen Erscheinungen werden durch Einheiten gemessen, die sich durch drei Grundeinheiten: die der Länge, die der Masse und die der Zeit, darstellen lassen. Als Einheit der Länge dient das Centimeter, als Masseneinheit die Masse eines Grammes und als Zeiteinheit die Sekunde. Diese drei Grössen schreibt man abgekürzt: *cm*, *g*, sek. (Manche Schriftsteller gebrauchen auch die Zeichen L, M, T).

Diese Einheiten und die aus ihnen abgeleiteten heissen absolute, weil sie von Zeit und Ort der Beobachtung unabhängig sind.

Das auf die oben erwähnten Grundeinheiten bezogene Masssystem heisst daher auch das Centimeter-Gramm-Sekunden-System.

2. Die Dimension einer Masseinheit.

Die Beziehung einer Masseinheit zu den ebengenannten drei Grundeinheiten wird die Dimension der zu messenden Grösse genannt. Die Flächeneinheit ist z. B. das Quadratcentimeter, die Dimension der Fläche ist: $[cm^2]$; die Volumeneinheit ist das Kubikcentimeter, die Dimension des Volumens ist somit: $[cm^3]$.

Unter Geschwindigkeit versteht man bekanntlich den Weg, der in der Zeiteinheit zurückgelegt wird. Als Einheit dient diejenige Geschwindigkeit, bei der ein Körper in einer Sekunde einen Weg von einem Centimeter zurücklegt. Die Geschwindigkeit ist

$$\frac{\text{Weg in Centimetern}}{\text{Anzahl der Sekunden}},$$

die Dimension der Geschwindigkeit wird: $[cm^1 \text{ sek}^{-1}]$.

Unter Dichte oder spezifischer Masse einer Substanz versteht man die Masse, die in einem Kubikcentimeter des Körpers enthalten ist; man erhält dieselbe, wenn man die Gesamtmasse des Körpers

durch das Volumen desselben dividiert. Die Benennung ist somit:

$$\frac{\text{Gramm}}{\text{Kubikcentimeter}},$$

die Einheit ist hiernach: [cm^{-3} g].

Diese nach den Regeln der Algebra gebildeten symbolischen Ausdrücke von der Form: [cm^p g^q sek^r] nennt man die Dimension der betreffenden Grösse.

3. Einheiten der Mechanik.

a) Geschwindigkeit.

Im vorhergehenden ist beispielsweise mitgeteilt, dass die Einheit der Geschwindigkeit diejenige Geschwindigkeit ist, bei der in einer Sekunde der Weg von 1 Centimeter zurückgelegt wird. Die Dimension der Geschwindigkeit ist: [cm sek^{-1}].

b) Beschleunigung.

Ein Punkt bewegt sich mit der Einheit der Beschleunigung, wenn die Geschwindigkeit desselben in jeder Sekunde um 1 *cm* zunimmt. Demnach ist die Beschleunigung der Quotient aus Geschwindigkeit durch Zeit, also $\frac{\text{Centimeter / Sekunde}}{\text{Sekunde}}$ oder $\frac{\text{Centimeter}}{\text{Sekunde}^2}$. Die Dimension der Beschleunigung ist hiernach: [cm^1 sek^{-2}].

c) Kraft.

Die Einheit der Kraft, Dyne[1]) genannt, ist diejenige Kraft, durch welche der Masse von 1 Gramm in einer Sekunde eine Beschleunigung von 1 Centimeter erteilt wird. Kraft ist bekanntlich das Produkt aus Masse mal Beschleunigung[2]), die Dimension der Kraft ist demnach: [cm^1 g^1 sek^{-2}].

An einem Punkte an der Erdoberfläche, an dem die Beschleunigung der Schwere 981 *cm* beträgt, wird die Masse eines Grammes mit einer Kraft von 981 Dynen, die Masse eines Kilogrammes mit 981000 Dynen von der Erde angezogen.

d) Arbeit.

Die von einer Kraft geleistete Arbeit wird durch das Produkt aus dieser Kraft und dem in der Richtung der Kraft genommenen

[1]) Vom griechischen Worte δυναμις, Kraft, abgeleitet.

[2]) Früher war es üblich, Kräfte durch die Kraft zu messen, mit der die Masse eines Grammes unter der Breite der Sternwarte von Paris in einer Seehöhe 0 von der Erde angezogen wurde. Seitdem man sich geeinigt hat das Gramm als Masseneinheit zu verwenden, ist dies nicht mehr angängig.

Weg gemessen. Ist p die Kraft, s der Weg, auf dem die Kraft in ihrer Richtung gewirkt hat, so ist p · s die geleistete Arbeit. Da die Kraft p die Dimension [cm^1 g^1 sek^{-2}] hat und der Weg eine Länge von der Dimension *cm* ist, so ergiebt sich die Dimension der Arbeit zu: [cm^2 g^1 sek^{-2}]. Als Einheit dient die Arbeit, die eine Kraft von 1 Dyne auf einem Wege von 1 *cm* Länge geleistet hat, und diese Einheit heisst 1 Erg.[1])

Die in der Technik vielfach verwendete Arbeitseinheit »1 Kilogrammmeter« ist hiernach (da 1 *m* = 100 *cm*, 1 *kg* = 981000 Dynen ist):

$$1\ kgm = 9{,}81 \times 10^7\ \text{Erg} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

Denselben Dimensionsausdruck [cm^2 g^1 sek^{-2}] erhält man auch für das Drehungsmoment oder das Moment einer Kraft, da dies das Produkt aus Kraft mal Abstand ist. Die Einheit des Drehungsmomentes bildet ein Kräftepaar, bei dem eine Kraft von je 1 Dyne senkrecht an den Enden eines geradlinigen Hebels von 1 *cm* Länge angreift.

e) Das mechanische Wärmeäquivalent,

d. h. die Arbeit, welche der Wärmemenge äquivalent ist, die erforderlich ist, um 1 *g* Wasser um 1° C. zu erwärmen, lässt sich leicht berechnen. Bekanntlich ist eine Kilogrammkalorie (= 1000 Grammkalorien) = 425 *kgm*, somit:

$$1000\ \text{Grammkalorien} = 425 \cdot 9{,}81 \cdot 10^7 = 41700000000\ \text{Erg},$$

$$1\ \text{Grammkalorie} = 4{,}17 \cdot 10^7\ \text{Erg} \quad \ldots\ldots \quad 2)$$

Das kalorische Äquivalent der abgeleiteten Arbeitseinheit ist hiernach:

$$1\ \text{Erg} = 0{,}24 \cdot 10^{-7}\ \text{Grammkalorien} \quad \ldots\ldots \quad 3)$$

Die Dimension des Arbeitsäquivalentes der Wärme ist:

$$\frac{\text{Arbeit}}{\text{Gramm}} = [cm^2\ sek^{-2}],$$

und die Dimension des kalorischen Äquivalentes der Arbeitseinheit [cm^{-2} sek^2]. Die Dimension der Wärmemenge ist selbstverständlich gleich der der Arbeit, also: [cm^2 g^1 sek^{-2}].

Für die mechanische Arbeit von 10^7 Erg wird vielfach auch der Name »Joule« gebraucht, sodass

$$1\ \text{Joule} = 10^7\ \text{Erg},$$

$$1\ \text{Grammkalorie} = 4{,}17\ \text{Joule},\ 1\ \text{Joule} = 0{,}24\ \text{Grammkalorie} \quad 4)$$

wird.

[1]) Von dem griechischen Worte το ἔργον, das Werk.

f) Leistung oder Effekt

wird die in je einer Sekunde geleistete Arbeitsmenge genannt. Die Dimension der Leistung ist somit

$$\frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} \text{ oder } \frac{[cm^2\ g\ \text{sek}^{-2}]}{\text{sek}} = [cm^2\ g\ \text{sek}^{-3}].$$

Als Einheit dient eine Leistung von 1 Erg in einer Sekunde, das Sekundenerg.

Demnach ist 1 Sekundenerg $= \frac{1}{9{,}81 \cdot 10^7}$ Sekundenkilogrammmeter. Die Maschinentechniker benutzen meist 75 Sekundenkilogrammmeter als Mass für die Leistungen an Maschinen und nennen diese Leistung eine Pferdestärke (PS).

$$1 \text{ PS} = 75 \cdot 9{,}81 \cdot 10^7 = 736 \cdot 10^7 \text{ Sekundenerg}$$
$$= 736 \text{ Joule in der Sekunde} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

4. Magnetische Einheiten.

a) Menge des Magnetismus, Polstärke.

Nach dem Coulomb'schen Gesetze (vergl. Kap. V, 2, S. 103) stossen sich zwei im Abstande r voneinander befindliche Mengen Magnetismus von der Grösse m_1 und m_2 ab oder ziehen sich an mit einer Kraft

$$f = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Setzt man $m_1 = m_2 = m$ und reduziert auf m, so findet man

$$m = r \cdot \sqrt{f}.$$

Die Dimension der magnetischen Quantität ist somit:

Länge $\cdot \sqrt{\text{Kraft}}$ oder $cm \cdot \sqrt{cm^1\ g^1\ \text{sek}^{-2}}$, d. i. $[cm^{3/2}\ g^{1/2}\ \text{sek}^{-1}]$.

Es wird $m = 1$, wenn $r = 1$ und $f = 1$ wird, d. h. die Einheit der magnetischen Quantität übt auf eine gleich grosse Menge von Magnetismus im Abstande von 1 *cm* eine Kraft von 1 Dyne aus.

b) Magnetisches Moment.

Bekanntlich ist das magnetische Moment $M = m \cdot l$, wo m die gleichen Mengen entgegengesetzter Magnetismen bedeutet, die man sich an den beiden Polen des Magneten vereinigt denkt. Die Länge l bedeutet den Abstand der Pole.

Die Dimension des magnetischen Moments ist hiernach das Produkt aus einer Länge mal der Menge des Magnetismus, somit:

Dimension des magnetischen Momentes $= [cm^{5/2}\ g^{1/2}\ \text{sek}^{-1}]$.

Die Einheit des Momentes besitzt ein Magnet, in dessen 1 *cm* voneinander abstehenden Polen magnetische Einheiten vorhanden sind.

c) Feldstärke.

Ein Magnetfeld besitzt die Einheit der Stärke, wenn in ihm auf die magnetische Quantität oder einen isolierten Pol von der Stärke 1 eine Kraft von der Stärke von 1 Dyne ausgeübt wird. Es muss somit ein Feld von der Stärke $\mathfrak{H}$ auf eine magnetische Quantität von der Grösse m eine Kraft von $\mathfrak{H} \cdot m$ Dynen ausüben. Daraus folgt:

$$\text{Dim } \mathfrak{H} \times \text{Dim m} = \text{Dim Kraft},$$

oder:

$$\text{Dim } \mathfrak{H} = \frac{\text{Dim Kraft}}{\text{Dim magn. Quantität}} = \frac{[cm^1\, g^1 \text{ sek}^{-2}]}{[cm^{3/2}\, g^{1/2} \text{ sek}^{-1}]}$$
$$= [cm^{-1/2}\, g^{1/2} \text{ sek}^{-1}].$$

Die Horizontalintensität der erdmagnetischen Kraft beträgt in Deutschland ungefähr 0,2 $[cm^{-1/2}\, g^{1/2} \text{ sek}^{-1}]$.

Die totale Intensität erdmagnetischer Kraft in der Richtung der Inklination schwankt auf der Erdoberfläche zwischen 0,3 und 0 7 dieser Einheiten.

d) Das Gesamtfeld Φ

wird bekanntlich erhalten, wenn man $\mathfrak{H}$ mit dem zur Richtung der Kraftlinien senkrechten Querschnitte des Feldes multipliziert. Daraus folgt:

$$\text{Dim } \Phi = \text{Dim } \mathfrak{H} \times \text{Dim Fläche}$$
$$= [cm^{-1/2}\, g^{1/2} \text{ sek}^{-1}] \times [cm^2] = [cm^{3/2}\, g^{1/2} \text{ sek}^{-1}].$$

5. Die absoluten elektromagnetischen Einheiten und die praktischen elektrotechnischen Einheiten.

a) Die Einheit der Stromstärke.

In dem VI. Kapitel haben wir für das magnetische Feld eines Kreisstromes den Wert (vergl. Kap. VI, 9, S. 140)

$$\mathfrak{H} = \frac{2\pi i}{R}$$

gefunden. Hieraus folgt, von Zahlenfaktoren abgesehen:

$$\text{Dim i} = \text{Dim } \mathfrak{H} \times \text{Dim R} = [cm^{-1/2}\, g^{1/2} \text{ sek}^{-1}] \times [cm]$$
$$= [cm^{1/2}\, g^{1/2} \text{ sek}^{-1}].$$

Als absolute Einheit der Stromstärke benutzt man nach dem Vorschlage Wilhelm Webers den Strom, der, einen Leiter von 1 *cm* Länge durchfliessend, auf eine in der Entfernung von 1 *cm* befindliche magnetische Quantität (auf einen isolierten Magnetpol) von der Stärke 1, eine Kraft von 1 Dyne ausübt. Wenn diese elektromagnetische Stromeinheit eine Fläche von 1 *qcm* umkreist, übt sie dieselbe magnetische Fernwirkung aus, wie ein Magnet, dessen 1 *cm* voneinander entfernte Pole jeder die Stärke 1 haben. Für den praktischen Gebrauch hat man jedoch den zehnten Teil dieser Strom-

stärke als Einheit gewählt und mit dem Namem 1 Ampère bezeichnet.[1] **Es ist daher**

$$1\ \mathrm{A} = 10^{-1}\ [cm^{1/2}\, g^{1/2}\, \mathrm{sek}^{-1}] \quad \ldots\ldots \quad 6)$$

b) Einheit der Elektrizitätsmenge.

Wir haben schon früher die Stromstärke als die in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt des Leiters hindurchfliessende Elektrizitätsmenge bezeichnet, oder Stromstärke $= \dfrac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Zeit}}$. Die Dimension der Elektrizitätsmenge c ist somit das Produkt aus der Dimension der Stromstärke i mal der Dimension der Zeit t, oder:

$$\mathrm{Dim}\ c = [cm^{1/2}\, g^{1/2}\, \mathrm{sek}^{-1}] \cdot [\mathrm{sek}^{1}] = [cm^{1/2}\, g^{1/2}].$$

Die elektromagnetische Einheit der Elektrizitätsmenge ist demnach gleich 1 $cm^{1/2}\, g^{1/2}$.

Die praktische Einheit der Elektrizitätsmenge heisst Coulomb[2]) (abgekürzt Cb), und ist:

$$1\ \mathrm{Cb} = 10^{-1}\ [cm^{1/2}\, g^{1/2}] \quad \ldots\ldots \quad 7)$$

1 Coulomb scheidet bei seinem Durchgange durch eine Zersetzungszelle 0,00001038 *g* Wasserstoff oder äquivalente Mengen anderer Stoffe, z. B. 0,001118 *g* Silber, aus. Die elektromagnetische Stromeinheit, deren man sich bedienen muss, wenn man Rechnungen in absoluten Einheiten ausführen will, ergiebt eine zehnmal grössere Menge.

c) Einheit des elektrischen Potentials. Volt.

In dem Abschnitte über Induktion haben wir gesehen, dass, wenn wir in einem gleichförmigen magnetischen Felde von der Feldstärke $\mathfrak{H}$ einen auf der Richtung der Kraftlinien senkrechten Leiter von der Länge l mit der Geschwindigkeit v in der Richtung der auf den Kraftlinien und auf der Richtung des Leiters gleichzeitig senkrecht stehenden Geraden verschieben, die im Leiter induzierte EMK von der Grösse E oder der Potentialunterschied $V_1 - V_2$ an den Enden dieses Leiters $E = V_1 - V_2 = \mathfrak{H} \cdot l \cdot v$ ist (vergl. Kap. VIII, 2, S. 165). Die Dimensionszahl der EMK ist hiernach das Produkt der Dimensionen der drei Grössen Feldstärke, Länge und Geschwindigkeit, mithin:

$$\mathrm{Dim}\ E = [cm^{-1/2}\, g^{1/2}\, \mathrm{sek}^{-1}] \times [cm^{1}] \times [cm^{1}\, \mathrm{sek}^{-1}]$$
$$= [cm^{3/2}\, g^{1/2}\, \mathrm{sek}^{-2}].$$

---

[1]) **Man vergleiche die Anmerkung auf S. 35. Daher kommt der Faktor $^1/_{10}$ in die Formel für die Tangentenbussole S. 140, und deshalb ist in Kap. IV, Abschn. 3, S. 82, das elektrochemische Äquivalent zehnmal kleiner angenommen, als es da geschehen ist, wo wir mit absoluten Einheiten gerechnet haben.**

[2]) **Zum Gedächtnis des Entdeckers des Coulomb'schen Gesetzes.**

Wir nennen diejenige EMK oder Potentialdifferenz, die induziert wird, wenn ein zur Kraftlinienrichtung senkrechter Leiter von 1 *cm* Länge mit einer Geschwindigkeit von 1 *cm* in einer Sekunde in einem Felde von der Stärke 1 in der zu den Kraftlinien und zum Leiter normalen Richtung bewegt wird, die Einheit der EMK.

Diese Einheit der EMK wäre aber für die meisten Zwecke der Elektrotechnik zu klein, denn sie ist weniger als der hundertmillionste Teil der EMK eines Daniellelementes. Man hat deshalb das hundertmillionfache der elektromagnetischen Spannungseinheit als praktische Einheit gewählt und nennt diese 1 Volt[1]) (abgekürzt V). Hiernach ist:

$$1\ \mathrm{V} = 10^8\ [cm^{3/2}\ g^{1/2}\ \mathrm{sek}^{-2}]\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ 8)$$

d) Einheit des Widerstandes.

Nach dem Ohm'schen Gesetze (Kap. I, Abschn. 8, S. 7) ist bekanntlich der Widerstand eines Leiterkreises gleich dem Quotienten aus der EMK und der Stromstärke. Die Dimension des Widerstandes w muss demnach der Quotient aus der Dimension der Spannung oder Potentialdifferenz E und der Dimension der Stromstärke i sein.

$$\mathrm{Dim\ w} = \frac{\mathrm{Dim\ E}}{\mathrm{Dim\ i}} = \frac{[cm^{3/2}\ g^{1/2}\ \mathrm{sek}^{-2}]}{[cm^{1/2}\ g^{1/2}\ \mathrm{sek}^{-1}]} = [cm^1\ \mathrm{sek}^{-1}].$$

Man bemerkt die auffällige Thatsache, dass der Widerstand die Dimension einer Geschwindigkeit hat. Es erklärt sich dies leicht durch folgende Betrachtung:

Bei dem zur Definition der Einheit der EMK benutzten Induktionsvorgange (man vergleiche das vorhergehende Kapitel VIII, S. 165) war $\mathrm{E} = \mathfrak{H} \cdot \mathrm{l} \cdot \mathrm{v}$.

Ist nun der Widerstand des Stromkreises w und die Stromstärke i, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze:

$$\mathrm{i} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{w}} = \frac{\mathfrak{H} \cdot \mathrm{l} \cdot \mathrm{v}}{\mathrm{w}} \text{ und } \mathrm{w} = \frac{\mathfrak{H} \cdot \mathrm{l}}{\mathrm{i}} \cdot \mathrm{v}.$$

Nach dieser Formel ist der Widerstand w die Geschwindigkeit v, mit welcher ein auf den Kraftlinien rechtwinkliger Leiter von der Länge $\mathrm{l} = 1$ *cm* in einem Felde von der Stärke $\mathfrak{H} = 1$ bewegt werden muss, um einen Induktionsstrom von der Stärke = 1 elektromagnetische Einheit zu erzeugen. Hieraus erkennt man, dass in der That der Leitungswiderstand als eine Geschwindigkeit aufgefasst werden kann.

Diese elektromagnetische Einheit des Widerstandes ist sehr klein; ferner wünschte man, dass auch für die praktischen Einheiten, wie für die Einheiten des absoluten *cm*-*g*-sek-Systems, das Ohm'sche

---

[1]) Zu Ehren des Physikers Volta.

Gesetz ohne Proportionalitätsfaktor giltig sei. Dies hat dazu geführt, dass man den tausendmillionfachen Betrag der elektromagnetischen Widerstandseinheit unter dem Namen Ohm[1] (abgekürzt ω) als praktische Widerstandseinheit gewählt hat:

$$1\ \omega = 10^9\ [cm^1\ \text{sek}^{-1}] \quad \ldots\ldots \quad 9)$$

Nach dem Ohm'schen Gesetze ist ebenfalls:

$$1\ \omega = \frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}} = \frac{10^8\ [cm^{3/2}\ g^{1/2}\ \text{sek}^{-2}]}{10^{-1}\ [cm^{1/2}\ g^{1/2}\ \text{sek}^{-1}]} = 10^9\ [cm^1\ \text{sek}^{-1}].$$

Der Widerstand von 1 Ohm kommt der ursprünglich von Werner v. Siemens vorgeschlagenen praktischen Einheit ziemlich nahe. Diese Siemenseinheit war der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 *m* Länge und 1 *qmm* Querschnitt bei 0° C. Temperatur des Quecksilbers.

Auf der Pariser elektrotechnischen Konferenz war einstweilen das Ohm zu 1,06 Siemenseinheiten festgestellt worden. In Wirklichkeit ist aber $1\ \omega = 10^9\ [cm\ \text{sek}^{-1}] = 1{,}063$ Siemenseinheiten . . 10)

Diese Grösse heisst seit dem internationalen Elektrotechniker-Kongress in Chicago das internationale Ohm.

Unter spezifischem Widerstande in physikalischem Sinne versteht man den Widerstand, den ein Würfel von 1 *cm* Seite, also ein Prisma von 1 *cm* Seite und 1 *qcm* Querschnitt, darbietet. In der elektrotechnischen Praxis benutzt man aber als spezifische Widerstände die Widerstände der Prismen von 1 *m* Länge und 1 *qmm* Querschnitt (vergl. Kap. I, Abschn. 12, S. 10). Sie sind 10^4 mal grösser als die erstgenannten; diese Werte sind auf S. 10 mitgeteilt worden.

e) Einheit der Kapazität.

Wenn eine Elektrizitätsmenge q erforderlich ist, um eine Metallkugel auf einen Potentialwert V zu laden, so nennt man die Grösse

$$K = \frac{q}{V}$$

die Kapazität des Leiters.

Sind q und V in elektromagnetischen Einheiten ausgedrückt, so erhält man auch K in diesem Masse. Da die Dimension der Elektrizitätsmenge (vergl. dieses Kapitel, 5, b) $[cm^{1/2}\ g^{1/2}]$ und die des Potentiales (vergl. dieses Kapitel, 5, d) $[cm^{3/2}\ g^{1/2}\ \text{sek}^{-2}]$ ist, so ergiebt sich hieraus die Dimension der Kapazität zu:

$$[cm^{1/2}\ g^{1/2}] : [cm^{3/2}\ g^{1/2}\ \text{sek}^{-2}] = [cm^{-1}\ \text{sek}^2].$$

Da diese Einheit aber für die Zwecke der Praxis viel zu gross wäre, hat man den 10^9ten Teil derselben unter dem Namen Farad[2] als Einheit der Kapazität eingeführt. Es ist somit:

$$1\ \text{Farad} = 10^{-9}\ [cm^{-1}\ \text{sek}^2] \quad \ldots\ldots \quad 11)$$

[1]) Zu Ehren des Physikers Ohm, der zuerst das nach ihm benannte Gesetz aufgestellt hat.

[2]) Zu Ehren des bereits mehrfach erwähnten Physikers Faraday.

Es stellt das Farad die Kapazität eines Leiters dar, der durch eine Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb auf einen Potentialwert von 1 Volt geladen werden würde.

Bekanntlich spielen in der Telegraphentechnik die Ladungserscheinungen, die an Kabeln vorkommen, eine grosse Rolle. Für diese Zwecke ist aber selbst das Farad noch eine zu grosse Einheit, deshalb benutzt man dort unter dem Namen Mikrofarad den millionsten Teil des Farads als Einheit:

$$1 \text{ Mikrofarad} = 10^{-15} [cm^{-1} \text{sek}^2] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Die Kapazität eines transatlantischen Kabels beträgt z. B. für jedes Kilometer Länge des Kabels ungefähr 0,2 Mikrofarad.

f) Einheit der elektrischen Arbeit und Leistung.

Bekanntlich ist es gleichgiltig, auf welche Weise eine Arbeit geleistet wird; jede Arbeit, gleichviel, ob sie von einer Maschine oder von einer Wärme- oder Elektrizitätsquelle geleistet worden ist, wird durch die Arbeitseinheit, das Erg, gemessen. Für die Zwecke der Elektrotechnik würde jedoch das Erg zu klein sein; man hat daher das Voltcoulomb (abgekürzt VCb), auch Joule genannt, den 10^7-fachen Betrag eines Erg, als praktische Einheit gewählt. Diese Arbeit wird geleistet, wenn die Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb auf ein um 1 Volt niedrigeres Potentialniveau gebracht wird.

Den Elektrotechniker interessiert aber bei seinen Aufgaben zumeist mehr die in der Zeiteinheit (1 Sekunde) geleistete Arbeit oder die elektrische Leistung (auch elektrischer Effekt genannt). Da nun ein elektrischer Strom, bei welchem in der Zeiteinheit i Coulomb durch jeden Querschnitt eines Leiters fliessen, ein Strom von i Ampère Stärke genannt wird, so ist das Volt-Ampère oder Watt die praktische Einheit der elektrischen Leistung. Die Dimension der elektrischen Arbeit ist die Dimension der Arbeit überhaupt, demnach $[cm^2 g^1 \text{sek}^{-2}]$; die Dimension der Leistung ist (vergl. dieses Kap., Abschn. 3, d) $[cm^2 g^1 \text{sek}^{-3}]$.

Der Grösse nach ist:

$$1 \text{ Voltcoulomb} = 1 \text{ Joule} = 10^7 cm^2 g^1 \text{sek}^{-2} = 10^7 \text{ Erg} \quad . \quad 13)$$

$$1 \text{ Voltampère} = 1 \text{ Watt} = \frac{1}{9,81} \text{ Sekundenkilogrammmeter} =$$
$$= \frac{1}{736} \text{ Pferdestärke} = 10^7 cm^2 g^1 \text{sek}^{-3} = 10^7 \text{ Sekunden-Erg} \quad 14)$$

Für die Leistung elektrischer Maschinen und Apparate oder elektrischer Anlagen wird zumeist das Kilowatt (= 1000 Watt) als Einheit gewählt.

$$1 \text{ Kilowatt} = 1000 \text{ Watt} = 1{,}36 \text{ Pferdestärken} \quad . \quad . \quad 15)$$

6. Dimension und Einheit der Selbstinduktion.

Wenn durch ein Solenoid ohne Eisenkern ein Strom von der Stärke i geschickt wird, so ist das erzeugte magnetische Gesamtfeld Φ

$$\Phi = L \cdot i.$$

In dieser Formel ist L der Koëffizient der Selbstinduktion des Solenoids. Daraus folgt:

$$L = \frac{\Phi}{i}.$$

Nun ist aber $\Phi = F \cdot \mathfrak{H}$, wenn F die zur Kraftlinienrichtung senkrechte Fläche ist, die vom Solenoid umspannt wird. Man hat somit:

$$L = \frac{F \cdot \mathfrak{H}}{i} \text{ und hieraus } \text{Dim } L = \frac{\text{Dim } F \times \text{Dim } \mathfrak{H}}{\text{Dim } i},$$

oder[1])

$$\text{Dim } L = \frac{[cm^2] \times [cm^{-1/2}\, g^{1/2}\, \text{sek}^{-1}]}{[cm^{1/2}\, g^{1/2}\, \text{sek}^{-1}]} = [cm^1].$$

In absoluten elektromagnetischen Einheiten ist der Selbstinduktionskoëffizient somit eine Länge, und seine Einheit ist das Centimeter.

Als praktische Einheit des Widerstandes ist das Ohm gewählt worden. Der Widerstand hat aber, wie wir (vgl. dies. Kap., Abschn. 5, d, S. 184) gesehen haben, die Dimension einer Geschwindigkeit, und zwar ist das Ohm die Geschwindigkeit von 1 Erdquadrant $= 10^9\ cm$ in einer Sekunde; deshalb hat man als praktische Masseinheit der Selbstinduktion den Quadranten gewählt und diese Grösse auf dem Internationalen Elektrotechniker-Kongresse in Chicago Henry genannt.

$$1 \text{ Henry} = 10^9\ [cm^1] \quad \ldots\ldots \quad 16)$$

7. Das elektrostatische Masssystem.

Während wir bei dem im vorstehenden erörterten elektromagnetischen Masssysteme die Wirkung elektrischer Ströme auf Magnete als Ausgangspunkt für die Definition der Einheit der Stromstärke gewählt und daraus zunächst die Einheit der Elektrizitätsmenge und weiterhin die Grössen der übrigen Einheiten entwickelt haben, kann man auch von der durch das Coulomb'sche Gesetz definierten Einheit der Elektrizitätsmenge (vergl. Kap. I, Abschn. 3, S. 3) ausgehen und daraus die anderen Einheiten herleiten.

Man erhält dann ein nach Dimension und Grösse verschiedenes System von Masseinheiten, welches das elektrostatische genannt wird. Da wir aber für die folgenden Betrachtungen ohne dasselbe auskommen können, verzichten wir darauf, näher auf dasselbe einzugehen.

---

[1]) Vergl. dieses Kap., Abschn. 4, S. 182.

X. Kapitel.

Die Messung der Stromstärke.

1. Direkte Bestimmungen.

Wenn es gilt, in der elektrotechnischen Praxis Messungen von Stromstärken vorzunehmen, um etwa die Angaben von Stromzeigern (Ampèremetern) oder von Strommessinstrumenten (Galvanometern) auf ihre Richtigkeit zu prüfen, so bedient man sich zu diesem Zwecke entweder eines der vorher beschriebenen Voltameter (vergl. Kap. IV, Abschn. 4, S. 84 u. ff.), der Tangentenbussole oder des Elektrodynamometers. Nur das Elektrodynamometer ist brauchbar, wenn man Wechselströme messen will.

Bei den zuletzt genannten Apparaten wird eine neue Bestimmung des Reduktionsfaktors vorausgeschickt, wenn man diese Zahl nicht bereits sicher kennt. Das Nähere hierüber ist in Kap. IV, Abschn. 4, bereits mitgeteilt worden.

Vielfach ist es nötig, durch Anbringung von Nebenschlüssen die das Messinstrument durchfliessende Stromstärke auf einen bekannten Bruchteil der zu messenden Stromstärke herabzusetzen. Auch hierüber ist das Erforderliche bereits früher (Kap. I, Abschn. 21, S. 21) angegeben worden.

2. Messung der Stromstärke mit dem Galvanometer.

Wenn es sich um die Messung von Stromstärken über 50 Amp. handelt, sind die voltametrischen Methoden nicht mehr bequem anwendbar; dann bedient man sich in der Praxis entweder der Tangentenbussole (vergl. Kap. VI, Abschn. 9, S. 140) oder des Torsionsgalvanometers (vergl. Kap. VI, Abschn. 13, S. 148) oder des Millivolt- oder Ampèremeters unter Anwendung geeigneter Nebenschlüsse.

Man giebt zu dem Zwecke den Galvanometern für Strommessungen Abzweigwiderstände von geringer Grösse bei[1]). Für die Instrumente, die gerade einen Widerstand von 1 ω haben, betragen diese Neben-

[1]) Die Schaltung zeigt Fig. 7, S. 21. In der Praxis stellt man G möglichst weit entfernt von w′ auf, und wählt als Zuleitungen dicke, biegsame Kabel, die man in der Nähe des Torsionsgalvanometers zusammendrillt.

schlüsse genau $^1/_9$, $^1/_{99}$, $^1/_{999}$ und $^1/_{4999}$ ω; dann kann man z. B. am Torsionsgalvanometer oder Millivoltmeter Stromstärken bis 1,7, 17, 170, 850 A unmittelbar ablesen, da 1° Ausschlag dieser Instrumente gerade $^1/_{1000}$ A entspricht.

Früher wurden diese Hilfswiderstände aus Kupferseilen hergestellt; neuerdings fertigt man dieselben aus Metallgeflechten (Metallgaze) oder gewellten Blechen und wählt als Material Metalllegierungen (Manganin oder Constantan) von hohem Widerstande und sehr kleinem Temperaturkoëffizienten.

Besondere Vorsicht ist darauf zu verwenden, dass der von einem starken Strome durchflossene Nebenschluss keine magnetische Wirkung auf das Galvanometer ausübt. Jedenfalls bestimmt man vor jeder Ablesung die Nulllage des Instrumentes aufs neue, während gleichzeitig der Nebenschluss bereits von dem zu messenden Strome durchflossen wird.

Für Galvanometer, deren Windungen einen Widerstand von 100 ω darbieten, werden diese Nebenschlüsse mit $^{100}/_{999}$, $^{100}/_{99}$, $^{100}/_9$ ω Widerstand hergestellt, und man liest an der Teilung des Galvanometers Stromstärken von 0,1 bis 17 A, 0,01 bis 1,7 A, oder endlich Stromstärken zwischen 0,001 und 0,17 A ab.

Man kann aber auch mit diesem Instrumente, bei welchem 1° Ausschlag genau einer Stromstärke von 0,0001 A entspricht, bedeutend stärkere Ströme messen, wenn man sich kleine Widerstände von passender Grösse verschafft.

Es ist z. B. vorgeschlagen worden[1]), ein Stück Nickelinblech, dessen Widerstand nahezu 0,1 ω beträgt (ungefähr 0,25 *mm* dick, 12 *cm* breit, 7,5 *m* + 0,16 *m* lang), in 4 genau gleiche Teile zu teilen, jedes Ende an einen 2 *cm* breiten, 2—4 *mm* dicken, 12 *cm* langen Kupferstreifen anzulöten und diese 8 Enden mit passenden Klemmschrauben zu versehen. Man ordnet diese 8 Enden möglichst dicht nebeneinander auf einem passenden Holzgestelle an, so dass man durch dicke Kupferstäbe die 4 Stücke von je 0,025 ω sowohl hintereinander als parallel schalten kann.

Man schaltet alle 4 Blechstreifen hintereinander, sendet einen Strom von etwa 10 A hindurch und überzeugt sich durch Messung der Spannung an je zwei zusammengehörigen Enden, dass alle 4 Stücke genau gleichen Widerstand haben. Durch Schmälermachen der Bleche, die zu kleinen Widerstand haben, kann man es leicht dahin bringen, dass alle 4 Stücke genau gleichen Widerstand erhalten.

Hierauf sendet man den Strom, der durch die 4 hintereinandergeschalteten Streifen geht, gleichzeitig durch ein Knallgasvolta-

[1]) Grawinkel & Strecker, Hilfsbuch f. d. Elektrotechnik, S. 132.

meter. Die äussersten Enden der 4 Streifen verbindet man mit dem Torsionsgalvanometer und beobachtet den Ausschlag; derselbe sei α. Dann ist die Stromstärke im Galvanometer $\alpha \times 0{,}0001$ A. Ist die Stromstärke im unverzweigten Teile der Leitung mittels des Voltameters gleich J gefunden worden, so ist die Stromstärke im Nickelinbleche $i' = J - 0{,}0001 \cdot \alpha$, und es gilt (nach Gleichung 12, S. 19) für den gesuchten Widerstand w′ des Nickelinbleches

$$w' : 100 = 0{,}0001 \cdot \alpha : (J - 0{,}0001 \cdot \alpha),$$

oder

$$w' = 100 \cdot \frac{0{,}0001\,\alpha}{J - 0{,}0001\,\alpha},$$

und mit vollkommen genügender Genauigkeit

$$w' = \frac{0{,}01 \cdot \alpha}{J}.$$

Es ist der Widerstand,

wenn alle 4 Bleche hintereinander geschaltet sind: w',

» nur 2 » » » » $\frac{w'}{2}$,

» » 1 Blech allein benutzt wird: $\frac{w'}{4}$,

» man 2 Bleche parallel schaltet: $\frac{w'}{8}$,

» » 3 » » » $\frac{w'}{12}$,

» » 4 » » » $\frac{w'}{16}$.

Ein solcher Blechstreif kann mit 50 A Strom unbedenklich belastet werden; man kann daher, wenn alle 4 Streifen parallel geschaltet sind, Ströme von 200 A durch den Widerstand senden. Ist der Widerstand, den man als Nebenschluss verwendet, $\mathfrak{w}$ und beträgt die Ablesung am Torsionsgalvanometer von 100 ω Widerstand φ, so ist:

$$J = 0{,}0001 \cdot \varphi \frac{100 + \mathfrak{w}}{\mathfrak{w}} \text{ oder } J = \frac{0{,}01}{\mathfrak{w}} \cdot \varphi,$$

da für technische Messungen $\mathfrak{w}$ gegen den Galvanometerwiderstand von 100 ω vernachlässigt werden kann.

Für solche Messungen liefert ferner die Physikalisch-technische Reichsanstalt in Charlottenburg (Berlin) Normalwiderstände, die aus gewellten Blechstreifen hergestellt sind. Die kleineren, in Grössen von 0,02, 0,01, 0,005, 0,002 oder 0,001 ω, sind für eine normale Beanspruchung von 100 A bestimmt; andere, die mit Wasserkühlung versehen sind und eine Grösse von 0,001 bis 0,0001 ω haben, können Ströme von 1000 A aufnehmen, ohne eine erhebliche Temperaturkorrektion notwendig zu machen. Um den Einfluss der

Erwärmung auf die Grösse des Normalwiderstandes möglichst gering zu machen, werden die gewellten Bleche aus Metalllegierungen hergestellt, die einen äusserst geringen Temperaturkoëffizienten haben.

Auch mit jedem anderen zur Messung von Spannungsunterschieden (Potentialdifferenzen) geeigneten Instrumente kann man Stromstärken bestimmen. Man leitet zu dem Zwecke den zu messenden Strom durch einen Widerstand w von bekannter Grösse, der so beschaffen ist, dass er durch die Stromwärme keine merkliche Temperaturerhöhung erfährt, und bestimmt nach einer der im nächsten Kapitel zu besprechenden Methoden den Spannungsunterschied e an den Enden dieses Widerstandes. Nach dem Ohm'schen Gesetze ist alsdann:

$$i = \frac{e}{w}.$$

3. Der Zweck der Stromzeiger. Aichung.

In der elektrotechnischen Praxis kann man sich zumeist nicht mit Messungen der Stromstärke auf voltametrischem Wege oder auf die Anwendung von Galvanometern mit Nebenschlüssen einlassen, da jede solche Bestimmung eine längere Zeit oder eine Rechnung in Anspruch nimmt, während zumeist daran gelegen ist, in jedem beliebigen Augenblicke die Stärke des Stromes unmittelbar ablesen zu können. Für die Zwecke der Praxis sind daher Vorrichtungen konstruiert worden, die es gestatten, an der Stellung eines auf einer Skala spielenden Zeigers fortdauernd die Stromstärke in Ampère zu beobachten; solche Instrumente nennt man Stromzeiger oder Ampèremeter.

Durch Vergleich des Zeigerausschlages des Stromzeigers mit den Angaben einer Tangentenbussole, deren Reduktionsfaktor bekannt ist, den Ergebnissen voltametrischer Messungen oder den Ausschlägen eines mit geeigneten Nebenschlüssen versehenen Galvanometers wird die verschiedenen Ausschlägen entsprechende Stromstärke bestimmt und damit auf dem Wege des Versuches (empirisch) die Einteilung der Skala des Strommessers bestimmt. Diese erstmalige Feststellung oder spätere Nachprüfung der Skala nennt man das Aichen des Instrumentes.

Man bringt zu dem Zwecke das zu aichende Instrument genau in die Lage, in der es späterhin verwendet werden soll, und versieht es vorläufig mit einer willkürlichen, aus gleichen Teilen bestehenden Skala. Hierauf bestimmt man für eine grössere Zahl von bekannten Stromstärken den Ausschlag in diesen willkürlichen Skalenteilen und stellt das Ergebnis in einem Koordinatensystem (Fig. 88) graphisch dar, indem man die Stromstärken als Abscissen, die abgelesenen Skalenteile als zugehörige Ordinaten aufträgt. Die Endpunkte der

Ordinate verbindet man durch eine Linie. Aus dieser Zeichnung der Aichungskurve bestimmt man alsdann die Stellen der Skala, welche den Ampèrezahlen entsprechen, die man auf die Teilung aufnehmen will.

Beispiel. Aichung eines älteren, kleinen Kohlrausch'schen Stromzeigers von Hartmann & Braun für 0 bis 10 A.

Beobachtete Stromstärke .	0	2,1	3,1	4,2	4,5	5,1	6,0	6,6
Ablesung an der Skala . .	0	2,5	12,0	22,0	25,0	27,9	35,0	41,9
Beobachtete Stromstärke .	7,1	7,5	8,0	8,7	9,2	10,1		
Ablesung an der Skala . .	45,9	48,0	49,5	52,0	53,2	55,0.		

Nach der obenstehenden Aichungskurve (Fig. 88) setzt man:

	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	6 A	7 A	8 A	9 A	10 A
an den Skalenteil	0,8	2,4	11,5	20,5	27,2	35,0	45,0	49,5	52,6	54,7.

In Wirklichkeit wird man die Zeichnung in mehrfach grösserem Massstabe ausführen, um eine grössere Genauigkeit zu erzielen. Die Skala des Instrumentes würde dann die nebenstehende Teilung erhalten (vergl. Fig. 89).

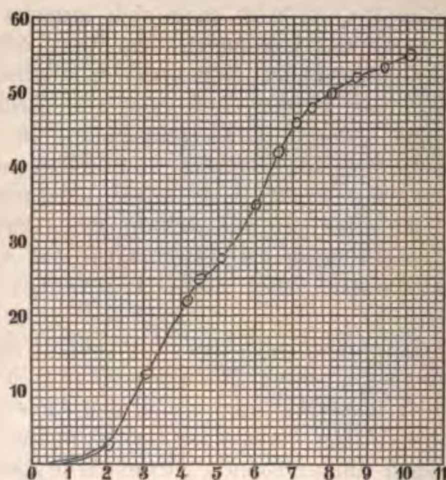


Fig. 88. Aichungskurve eines kleinen Stromzeigers.

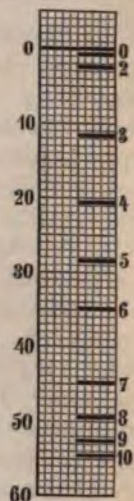


Fig. 89. Empirische Teilung des Stromzeigers.

Fast alle älteren Stromzeiger sind so eingerichtet, dass ein kleines, bewegliches Stück weiches Eisen durch die Wirkung des zu messenden Stromes eine von der Stärke des zu messenden Stromes abhängige Lagenänderung erfährt, während dieser Lagenänderung durch die Schwerkraft oder durch die Elastizität einer Feder entgegengewirkt wird. Die Lagenänderung des Eisenstückes bewirkt die Bewegung eines Zeigers, der auf einer Skala spielt.

Wir wollen uns hier mit der Besprechung einiger derartiger Vorrichtungen begnügen, welche vorzugsweise in Deutschland gebräuchlich sind.

4. Verschiedene Stromzeiger.

a) Der Strommesser von Hummel.

In einem flachen Solenoide W (vergl. Fig. 90) ist excentrisch ein kleines gebogenes Eisenblech c um eine Achse oo drehbar. Mit diesem Eisenbleche ist ein leichter Zeiger z fest verbunden, der auf einer Skala spielt. Der das Solenoid durchfliessende Strom ist bestrebt, das excentrisch gelagerte Blech c näher an die Wand der Spule W heranzuziehen, weil das magnetische Kraftlinienfeld in der Nähe der Wandungen einer Spule dichter ist, als in der Mitte. Diese Zugkraft wächst mit der Stromstärke; ihr entgegen wirkt das Eigengewicht des Bleches und des Zeigers. Durch ein kleines Gegengewicht g wird die Empfindlichkeit des Instrumentes und das Trägheitsmoment vergrössert.

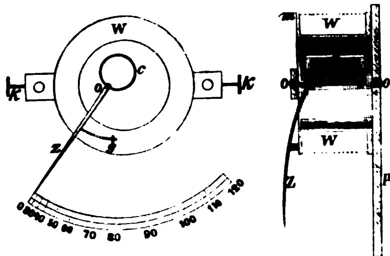


Fig. 90. Hummel-Ampèremeter.



Fig. 91. Strommesser der El.-Akt.-Ges. vorm. Schuckert & Co.

Vorstehende Abbildung (Fig. 90) zeigt Vorder- und Seitenansicht in schematischer Darstellung. Fig. 91 giebt ein Bild von der äusseren Erscheinung des Instrumentes.

b) Strommesser von Hartmann & Braun.

Bei diesem Apparate ist ein Teil der inneren Wand der Spule mit Eisenblech ausgekleidet, und dadurch wird ein unsymmetrisches magnetisches Feld erzeugt. Von diesen Eisenblechen wird ein anderes, im Halbkreis nach einem konzentrischen Cylindermantel gekrümmtes, kleines weiches Eisenblech angezogen, welches um eine central gelegene Achse drehbar ist. An der Achse ist ausserdem ein Zeiger befestigt. Die Anordnung kann aus Fig. 92 ersehen werden.

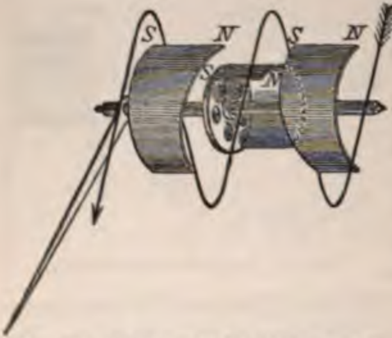


Fig. 92. Einrichtung des Strommessers von Hartmann & Braun.

c) Ampèremeter von Siemens & Halske.

In die Windungen einer Spule K taucht der Anfang eines aus weichem Eisen hergestellten Ringsegmentes R, das mit einem Zeiger Z



Fig. 93. Älterer Stromzeiger von Siemens & Halske.

und einem Gegengewicht G verbunden und um eine Achse A drehbar ist. Je stärker der durch die Windungen fliessende Strom ist, um so

tiefer wird das Eisenstück in die Spule hineingezogen. Vergl. die nebenstehende Fig. 93.

Mit dem Ende des beweglichen Eisenkörpers dieser und ähnlicher Apparate kann in einfacher Weise eine Luftbremse verbunden werden. Die Einstellungen des Zeigers erfolgen dann fast vollkommen aperiodisch.

Neuerdings hat dieselbe Firma einfache, wenig kostspielige Schaltbrettinstrumente für Strom- und Spannungsmessungen nach einem etwas anderen Prinzipe hergestellt und bei diesen Apparaten eine äusserst wirksame Luftdämpfung angebracht.

Eine längliche Spule, deren Windungen von dem zu messenden Strome durchflossen werden, hat einen schmalen, spaltartigen Luftraum. In diesen Raum taucht ein dünner, aus weichstem Eisen hergestellter Eisenkörper von eigentümlicher, aus Fig. 94 ersichtlicher Form. Dieser Eisenkörper ist mit einem Zeiger, der Dämpfungseinrichtung und kleinen verstellbaren Gegengewichten an einer Achse befestigt, die in Lagern von Saphiren spielt.



Fig. 94. Eisenkörper, Zeiger, Dämpferscheibe der neueren Strommesser von Siemens & Halske.

In einem kreisförmig gebogenen, unten geschlossenen Rohre (vergl. auch Kap. XII, Abschn. 4) bewegt sich, ohne irgendwie an den Wandungen des Rohres anzustreifen, eine Dämpferscheibe, die durch einen passend geformten, starren Arm mit der Achse des Instrumentes, die den Eisenkörper und den Zeiger trägt, fest verbunden ist.

Durch eine Schutzhülle aus weichem Eisen (in Fig. 95 vom Apparate teilweise entfernt und links daneben abgebildet) wird der Apparat gegen das Eindringen magnetischer Kraftlinien benachbarter Leitungen oder Elektromagnete vollkommen geschützt. Fig. 96 zeigt die Vorderansicht des Apparates mit der auf empirischem Wege geteilten Skala.

Da die Wickelung der Spule dem Eisenkörper sehr nahe ist, genügen meist schon sehr wenige Windungen, um durch den zu messenden Strom ein starkes Einsenken des Eisenkörpers in den Spalt, und somit einen grossen Zeigerausschlag hervorzubringen.

d) Stromzeiger mit geradem Kern, der in ein Solenoi eingezogen wird.

In ein vertikal stehendes Solenoid taucht das untere Ende e kleinen weichen Eisenstabes oder eines Bündels dünner wei Eisendrähte, welches an dem einen Ende eines Winkelhebels gehängt ist. Am anderen Ende des Hebels befindet sich ein Ge

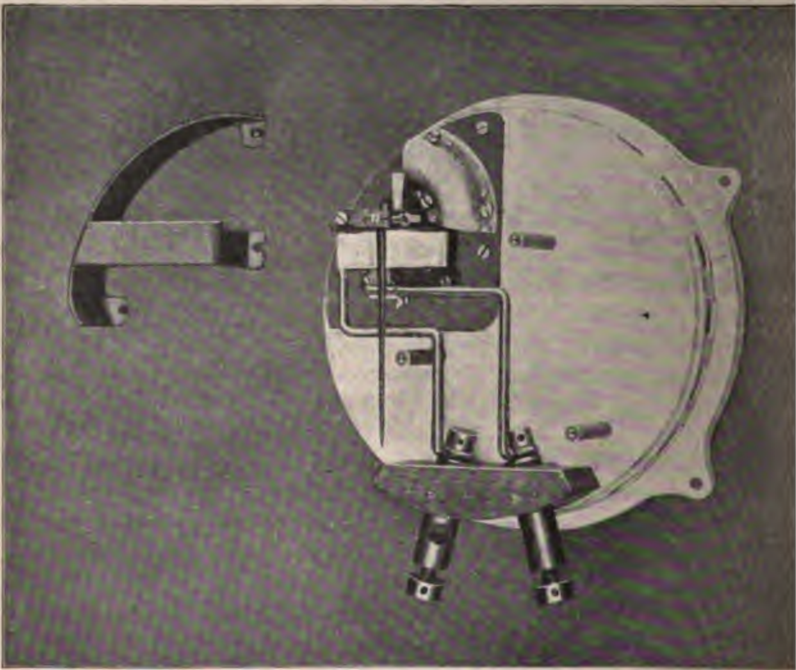


Fig. 95. Innere Einrichtung der neueren Schaltbrettstromzeiger von Siemens & Hal

gewicht, welches der auf das Eisen ausgeübten Zugkraft dadu das Gleichgewicht hält, sodass der Hebelarm dieses Gewichtes wäch wenn die Eisendrähte in das Solenoid hineingezogen werden. der Drehachse ist ein Zeiger verbunden, dessen Ende auf e Skala zeigt.

Nebenstehende Abbildung (Fig. 97) zeigt eine solche Einrichtu wie sie von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Be vielfach gebaut wird. e ist der aus Eisendrähten hergestellte Ke d sind die vorher erwähnten Gegengewichte; mit c ist die Drehac bezeichnet, an der auch der Zeiger f befestigt ist; g ist die Platte, der die Skala aufgezeichnet ist. Bei diesem Instrumente befindet s



Fig. 96. Aeussere Ansicht der neueren Schaltbrettstromzeiger von Siemens & Halske.

bei den geringsten Stromstärken der Eisenkern am nächsten der Wand der Spule a, woselbst die Anziehung am stärksten ist.

Bei einem nach gleichem Prinzipe konstruierten Strommesser von Siemens & Halske werden zwei fest miteinander verbundene Eisenstäbchen verwendet. Diese Eisenstäbchen bewegen sich ganz in der Nähe der Spulenwand, da dort das Magnetfeld am stärksten ist.

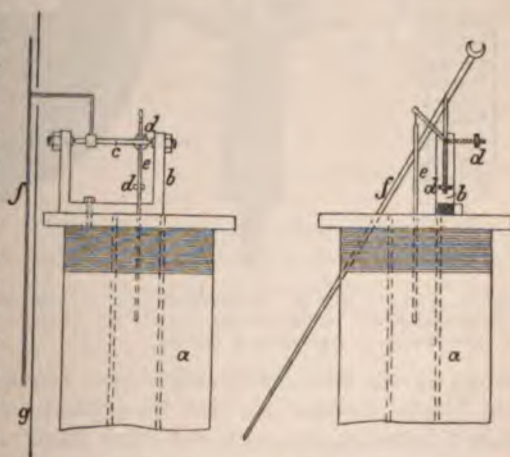


Fig. 97. Stromzeiger der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin.

Auch andere, wie z. B. H. Pöge in Chemnitz, Gülcher, W. Thomson, haben Strommesser konstruiert, die auf der Anziehung eines Eisenkernes durch eine Spule beruhen.

Bei allen diesen Apparaten werden nur sehr kleine Eisenkerne aus weichstem Eisen benutzt, die schon von den schwächsten zu messenden Stromstärken bis zur Sättigung magnetisiert werden, um auf diese Weise den Einfluss der Hysteresis möglichst zu vermindern. Die Bewegung des Eisens im Innern der Spule ist sehr klein, um eine aus möglichst gleich grossen Teilen bestehende Skala zu erhalten.

e) Der Federstromzeiger von F. Kohlrausch.

Bei diesem Instrumente (Fig. 98) wird eine hohle, oben geschlossene, unten offene, dünne Eisenröhre E, die an einer Spiralfeder f

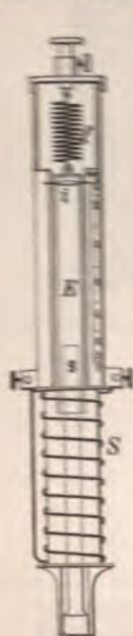


Fig. 98. Federstromzeiger von F. Kohlrausch.



Fig. 99. Federstromzeiger von Hartmann & Braun.



Fig. 100. Federampèremeter in Dosenform.

hängt, in ein Solenoid S eingezogen, durch das man den zu messenden Strom sendet. An der Eisenröhre ist ein als Marke dienender Stift i befestigt, der sich auf einer Skala verschiebt. In das Innere der Eisenröhre hinein ragt ein Messingstab s, sodass die Reibung der zwischen diesem Stabe s und der Röhre E aus- und eintretenden

Luft die Bewegungen des als beweglicher Kern dienenden Eisenrohres gut dämpft.

Da die Anziehung eines Solenoides auf einen cylindrischen Kern bei verschiedener Tiefe des Eintauchens des Eisens in die Spule sehr verschieden gross ist, so erhält die Skala meist eine sehr ungleiche Teilung (vergl. das vorhergehende Beispiel, Fig. 89). Wenn das Instrument jedoch von Zeit zu Zeit nachgeprüft und keine zu grosse Genauigkeit beansprucht wird, genügt dasselbe den Ansprüchen der Praxis. Fig. 99 zeigt die äussere Erscheinung des Instrumentes. Neuerdings haben Hartmann & Braun, von welchen die Kohlrausch'schen Ampèremeter angefertigt werden, denselben eine etwas veränderte Form gegeben. Die Hebung des an einer Feder hängenden Eisenkernes durch die Anziehung des Solenoides wird durch einen Hebel auf einen um eine Achse drehbaren Zeiger übertragen, der auf eine Skala weist. In dieser Gestalt kann das Instrument in Dosenform gebracht werden, wie dies in Fig. 100 dargestellt ist.

Bei Messapparaten für schwächere Ströme wird das Solenoid mit isolierten Kupferdrähten oder Kabeln bewickelt. Für stärkere Ströme stellt man die Windungen durch Fräsen aus blankem Kupfer her und benutzt Luftisolation.

5. Präzisionsstrommesser.

Nach dem früher (vergl. Kap. VI, Abschn. 16, S. 151) beschriebenen Prinzipe der Deprez-d'Arsonval'schen Spulengalvanometer werden auch Schaltbrettampèremeter gebaut, die sich durch strenge Proportionalität des Anschlages auszeichnen und einen ausserordentlich geringen Energieverbrauch aufweisen. Da der Schwerpunkt der beweglichen Spule nebst Zeiger ganz genau mit der Drehachse dieser Teile zusammenfällt, können solche Instrumente ebenso gut in vertikaler, als in horizontaler Lage benutzt werden. Die Instrumente sind genau ebenso gebaut, wie die Laboratoriumsapparate (vergl. Kap. XI, Abschn. 4, S. 206).

Man misst mit dem Spulengalvanometer einen kleinen Bruchteil des Stromes, indem man, wie bei Gebrauch des Torsionsgalvanometers und ähnlicher Apparate, einen Nebenschluss verwendet, dessen Widerstand ein kleiner Bruchteil von dem Widerstand des Galvanometers ist. (Vergl. Kap. I, Abschn. 21, S. 22).

Bis etwa 100 Ampère werden die Nebenschlüsse gleich in das Instrument mit eingebaut. Für höhere Stromstärken wird der Nebenschluss besonders geliefert. Die nähere Beschreibung der Präzisionsmessinstrumente folgt im nächsten Kapitel.

XI. Kapitel.

Spannungsmessungen.

1. Direkte Spannungsmessungen. Elektrometer.

Es giebt eine Reihe von Vorrichtungen, mit welchen man unmittelbar den Potentialunterschied zweier Punkte messen kann. Dieselben führen den Namen Elektrometer. Sie beruhen auf der elektrostatischen Anziehung und Abstossung, welche elektrisch geladene Körper aufeinander ausüben. Da diese Apparate in der praktischen Elektrotechnik im allgemeinen keine Anwendung finden, sondern vorzugsweise nur in Laboratorien gebraucht werden, wollen wir uns darauf beschränken, an dieser Stelle mit einigen Worten das diesen Instrumenten zugrunde liegende Prinzip auseinander zu setzen.

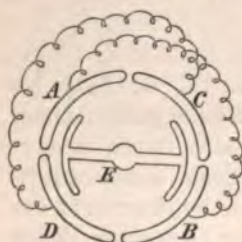


Fig. 101. Einrichtung des Elektrometers.

a) Ein Metallcylinder wird in 4 Quadranten A, B, C, D (vergl. Fig. 101) zerschnitten, die voneinander isoliert sind. A und B werden durch einen Draht miteinander verbunden und positiv geladen; ebenso sind C und D leitend miteinander verbunden und gleich stark wie A und B, aber negativ geladen. Vor diesen 4 Cylindersegmenten hängt an einer Spiralfeder ein beweglicher Metallkörper E, der aus zwei cylindrischen Platten besteht, die oben und unten durch Bänder verbunden sind.

Hat dieser Metallkörper E keine elektrische Ladung, so wird er von den positiv und negativ geladenen festen Cylindersegmenten A, B, C, D gleich stark angezogen, und er hat kein Streben, seine Stellung zu ändern.

Giebt man nun aber dem Metallstück E z. B. eine positive Ladung, so wird es von A und B abgestossen und von den negativ geladenen Cylindersegmenten C und D angezogen. E wird sich so lange drehen, bis die mit wachsender Drehung zunehmende elastische Gegenwirkung der Spiralfeder der anziehenden und abstossenden Kraft das Gleichgewicht hält.

Erteilt man dagegen E eine negative Ladung, so werden die Sektoren A und B eine Anziehung, die Sektoren C und D eine ab-

stossende Kraft ausüben, und es wird sich E im entgegengesetzten Sinne drehen. Will man nun eine konstante Potentialdifferenz messen, so ladet man zunächst die beiden Sektorenpaare AB und CD auf gleiche, aber entgegengesetzte Potentiale, indem man sie mit den beiden Polen einer wohl isolierten galvanischen Batterie verbindet, deren Mitte man zur Erde ableitet. Den beweglichen Rahmen E verbindet man durch seinen Aufhängedraht mit dem Pole eines Normalelementes oder einer Batterie solcher Elemente, deren EMK genau bekannt ist; den anderen Pol verbindet man mit der Erde. Die Ablenkung Θ, die man nun beobachtet, ist der bekannten EMK der Normalbatterie e proportional:

$$\Theta = A \cdot e \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Streng genommen ist, wenn e_1 und e_2 die Potentiale der beiden Quadrantenpaare und e das Potential des beweglichen Körpers ist, und Gleichgewicht zwischen elastischer Tension des Fadens und der Abstossung der Quadrantenpaare eingetreten ist,

$$\alpha = K \cdot (e_1 - e_2) \cdot \left\{ e - \frac{e_1 + e_2}{2} \right\} \quad \ldots\ldots \quad 2)$$

K ist eine von Einrichtung und Massverhältnissen des Apparates abhängige Konstante. Sind die beiden Quadrantenpaare gleich, aber entgegengesetzt geladen, so ist

$$\alpha = K \cdot 2\, e_1 \cdot e.$$

Wenn e_1 konstant ist, und $K \cdot 2\, e_1 = A$ gesetzt wird, erhält man Gleichung 1).

Nun wiederholt man den Versuch, indem man den einen der beiden Punkte, deren Potentialdifferenz V bestimmt werden soll, mit der Erde, den anderen mit E verbindet. Es erfolgt nun eine neue Ablenkung Θ'. Auch diese ist in derselben Weise dem Potential V proportional, sodass man hat:

$$\Theta' = A \cdot V.$$

Hieraus folgt:

$$V = \frac{\Theta'}{\Theta} \cdot e \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

b) Eine zweite Art des Gebrauches des Elektrometers kommt dann zur Anwendung, wenn e im Vergleich zu $e_1 + e_2$ verhältnismässig sehr gross ist, dann kann in Gleichung 2) der Wert $\frac{e_1 + e_2}{2}$ in der zweiten Klammer gegen e vernachlässigt werden, und man erhält $\alpha = K \cdot e\, (e_1 - e_2)$
oder, wenn man $K \cdot e = K''$ setzt:

$$\alpha = K'' \cdot (e_1 - e_2) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Man elektrisiert in diesem Falle das bewegliche Stück des Elektrometers, die Nadel, verhältnismässig hoch, indem man es mit dem

inneren Belege einer Leydener Flasche verbindet, deren äusserer Beleg zur Erde abgeleitet ist.

Die Punkte, deren Potentialunterschiede gemessen werden sollen, werden jeder mit einem Paare gegenüberstehender Quadranten verbunden. Der Ablenkungswinkel des beweglichen Stückes, den man beobachtet, ist dann der zu messenden Potentialdifferenz $e_1 - e_2$ proportional.

Die Grösse K″ bestimmt man dadurch, dass man die Ablenkung für eine bekannte Potentialdifferenz beobachtet, indem man z. B. die beiden Quadrantenpaare mit den Polklemmen eines Normalelementes verbindet.

P′ P″

Fig. 102. Doppelschaltung bei Gebrauch des Elektrometers.

c) Die dritte Schaltungsart (Doppelschaltung genannt) ist dagegen besonders für die Messung von Wechselspannungen geeignet.

Man verbindet in diesem Falle sowohl das bewegliche Stück als ein gegenüberstehendes Quadrantenpaar mit dem einen Punkte P″, das andere gegenüberstehende Quadrantenpaar mit dem anderen Punkte P′ der beiden Punkte P′ P″, deren Potentialdifferenz ermittelt werden soll.

Dann ist $e = e_1$ und somit

$$\alpha = K\,(e_1 - e_2) \left\{ e_1 - \frac{e_1 + e_2}{2} \right\} = \frac{K \cdot (e_1 - e_2)^2}{2}.$$

Setzt man $e_1 - e_2 = E$ und $\frac{K}{2} = K'''$,

so ist
$$\alpha = K''' \cdot E^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

Der Ausschlag ist in diesem Falle also proportional dem Quadrate des zu messenden Spannungsunterschiedes. Auch ändert der Ausschlag bei der Messung von Wechselspannungen seinen Sinn mit dem Richtungswechsel des Stromes nicht, da die Vorzeichen der Ladungen der Quadrantenpaare sich gleichzeitig mit dem Vorzeichen der Ladung des beweglichen Stückes ändern.

Die nebenstehende Fig. 102 erläutert die Verbindung der Quadrantenpaare und des beweglichen Stückes.[1])

Man legt nach erfolgter Messung an die Punkte P′ und P″ die Pole eines Normalelementes, dessen EMK von der Grösse E_1 bekannt ist, und beobachtet den Ausschlag α_1, dann ist:

$$\alpha_1 = K''' \cdot E_1{}^2$$

und folglich:

$$E = E_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_1}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

---

[1]) Das bewegliche Stück ist hier, wie bei dem Thomson'schen Quadrantelektrometer, als Lemniskate gezeichnet.

2. Edelmanns Cylinder-Quadrantenelektrometer.

Wir beschreiben in diesem Abschnitte nur beispielsweise die wesentlichen Teile eines solchen Apparates.

Das Edelmann'sche Instrument ist eine verbesserte Form der Thomson'schen Quadrantenelektrometer. Als Quadranten dienen vier kurze vertikale Cylindermantelstücke (Fig. 103), zwischen welchen eine am Torsionskopfe S aufgehängte Aluminiumnadel schwingt. Diese Aluminiumnadel besteht aus einem Arm, der zwei gegenüberliegende Cylindermantelstücke trägt, die einer zu den Quadranten konzentrischen Cylinderfläche angehören. Mit der Nadel ist ein Spiegel verbunden, dessen Stellung durch die mit Spiegelglas geschlossene Öffnung f beobachtet wird.

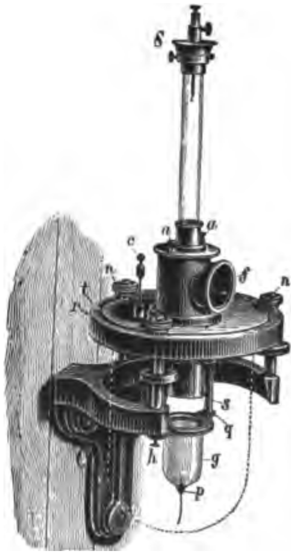


Fig. 103. Edelmanns Cylinder-Quadrantenelektrometer.

Die Zuleitung zur Nadel geschieht durch den Torsionskopf S u. durch die Aufhängung. Als Aufhängung dient ein Stück ganz dünnes Bronzeband (Lahn). Die ausgezeichnete Elastizität dieses Bronzebandes sichert eine gute Nulleinstellung. An der Nadel befindet sich unten eine Fahne, die bei g am Boden des Apparates in Petroleum eintaucht und eine kräftige Dämpfung veranlasst.

Von unten her umhüllt eine dicht anschliessende Glasglocke das Instrument. In dieser Glocke befindet sich eine stark hygroskopische Substanz, durch die man die Luft im Inneren völlig trocken erhält.

Die Genauigkeit beträgt bei 1 *m* Skalenabstand etwa 100 *mm* Skalenausschlag für 1 Volt.

3. Mittelbare Bestimmungen der Spannung durch das Torsionsgalvanometer oder Millivoltmeter.

Die mittelbaren Bestimmungen der Spannung beruhen darauf, dass man die beiden Punkte, deren Potentialunterschied bestimmt werden soll, durch einen hohen Widerstand von bekannter Grösse miteinander verbindet, in diese Leitung ein empfindliches Galvanometer mit bekanntem Widerstand einschaltet, und die Grösse des entstandenen Stromes misst. Allerdings muss der gesamte Widerstand so gross gewählt werden, dass der zu messende Potentialunterschied durch den erzeugten Strom nicht merklich verändert wird.

Ist e die zu messende Spannung und W der Widerstand (den Widerstand des Galvanometers eingeschlossen), so ist nach dem Ohmschen Gesetze

$$i = \frac{e}{W} \text{ und } e = i \cdot W.$$

Auf dieser Methode beruht besonders auch die Anwendung des Torsionsgalvanometers, des Millivoltmeters und ähnlicher Präzisionsinstrumente zur Messung von Spannungen (vergl. Kap. VI, Abschn. 13, S. 150.)

Zumeist werden die Windungen dieser Instrumente so hergestellt, dass sie entweder gerade (bei 20°) einen Widerstand von 1 ω oder einen solchen von 100 ω haben. Ausserdem werden Zusatzwiderstände verwendet, durch welche Widerstände von 9, 99, 999 ω im ersten Falle, oder von 900, 9900 oder 99000 ω im anderen Falle vorgeschaltet werden, sodass der Gesamtwiderstand gerade eine ganze Potenz von 10 beträgt.

Die Torsionsgalvanometer und das Millivoltmeter von Siemens & Halske sind so eingerichtet, dass die Ablesung an der Skala entweder sofort Volt ergiebt, oder dass aus der Ablesung durch Multiplikation oder Division mit 10, 100, 1000 die Spannung in Volt erhalten wird.

Die Schaltung für Spannungsmessungen mit Hilfe des Torsionsgalvanometers wird z. B. durch Fig. 104 erläutert, in der G das Galvanometer, W den Vorschaltwiderstand, z_1 z_2 z_3 Zuleitungen bedeutet, während A und B die beiden Punkte sind, deren Potentialunterschied gemessen werden soll.

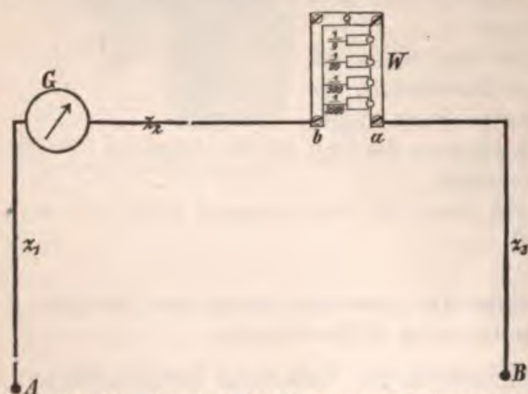


Fig. 104. Schaltung bei Spannungsmessungen.

Das Millivoltmeter wird genau so gebraucht, wie das Torsionsgalvanometer.

Die den Torsionsgalvanometern und Millivoltmetern beigegebenen Vorschaltwiderstände zeigen vielfach neben den Stöpsellöchern (vergl. Fig. 72, S. 150) unmittelbar die Bezeichnung aufgetragen, die angiebt, welchem Teile oder Vielfachen eines Volts ein Skalenteil-Ausschlag des Instrumentes entspricht.

Da neuerdings sowohl die Bewickelung der Galvanometer, als auch die Vorschaltwiderstände aus Drähten mit sehr niedrigem

Temperaturkoëffizienten hergestellt werden, spielt die Temperatur, bei welcher das Instrument gebraucht wird, nur eine geringe Rolle. Im allgemeinen sind die Apparate für eine Temperatur von 20^0 C. geaicht. Bei älteren Instrumenten, bei welchen die Bewickelung aus Kupferdrähten besteht, änderte sich der Widerstand für je 1^0 C. Temperaturunterschied noch um 0,37 %.[1])

Es ist daher ratsam, mit allen Torsionsgalvanometern nur in Räumen zu arbeiten, die möglichst auf 20^0 C. erwärmt sind, und den Strom stets nur kurze Zeit durch das Instrument gehen zu lassen, um Temperaturänderungen der Drähte durch Stromwärme möglichst auszuschliessen. Die Prüfung, beziehentlich Aichung der Voltmeter wird vorzugsweise mit dem Torsionsgalvanometer ausgeführt. Da aber der remanente Magnetismus des Glockenmagneten nicht ganz unveränderlich ist (das magnetische Moment nimmt in jedem Jahre um ungefähr 1,3—1,5 % ab), so muss entweder das Instrument in gewissen Zeiträumen zur Neujustierung an die Fabrik eingesendet werden, oder man prüft selbst mit Hilfe des Silbervoltameters (vergl. Kap. IV, Abschn. 4, c, S. 87).

Neuerdings haben Siemens & Halske Normalelemente (Daniellelemente) von grossen Abmessungen hergestellt, deren fünf parallel geschaltet bei 100 ω Widerstand des Schliessungskreises genau eine solche von 1,093 V und bei 10 ω Widerstand eine solche von 1,057 V Klemmenspannung geben. Für jede Untersuchung müssen die Elemente frisch zusammengesetzt werden. Zumal wenn das Torsionsgalvanometer einmal zu starke Ströme erhalten hat (etwa durch Einsetzen des Stöpsels in ein falsches Loch des Widerstandes), oder wenn starke Magnete in seine Nähe gekommen sind, muss man sich durch eine Nachprüfung davon überzeugen, welche Korrektionen an den Angaben des Instrumentes anzubringen sind, beziehentlich eine andere Torsionsfeder einsetzen lassen.

Bei den Millivoltmetern, die weiterhin beschrieben sind (Kap. XI, Abschn. 4, S. 206), kommen Veränderungen nur sehr selten vor.

---

[1]) Für diese Instrumente beträgt, wenn n^0 abgelesen worden sind und die Temperatur während der Beobachtung t^0 beträgt:

Beim Torsionsgalvanometer			
mit 1 ω Widerstand		mit 100 ω Widerstand	
Stöpselung	Berichtigung	Stöpselung	Berichtigung
1^0 = 0,001 Volt	$+ n \cdot 0,0037\ (t-20)$	1^0 = 0,01 Volt	$+ n \cdot 0,0037\ (t-20)$
= 0,01 »	$+ n \cdot 0,00037\ (t-20)$	= 0,1 »	$+ n \cdot 0,00037\ (t-20)$
= 0,1 »	zu vernachlässigen	= 1 »	zu vernachlässigen
= 1 »		= 10 »	
= 10 »			

4. Präzisionsspannungsmesser nach dem Prinzip der d'Arsonval-Galvanometer.

a) Spannungsmesser der Weston Electrical Instrument Co.

Einen ganz vorzüglichen tragbaren Spannungsmesser hat Weston nach dem Prinzipe des d'Arsonval'schen Galvanometers hergestellt. Vor dem so beliebten Torsionsgalvanometer von Siemens & Halske hat derselbe sogar noch den Vorzug voraus, dass er in jeder beliebigen Stellung gebraucht werden kann und dass der Vorschaltwiderstand (wenigstens bei den Instrumenten bis 1500 V) im Innern des Apparates mit angebracht ist.



Fig. 105. Einrichtung der Spannungsmesser von Weston.

Ein kräftiger Hufeisenmagnet (vergl. Fig. 105) endet in zwei cylindrisch ausgebohrte Polschuhe (vergl. Fig. 105). Zwischen diesen Polschuhen befindet sich ein fester, weicher Eisenkern, sodass ein sehr starkes und ziemlich gleichförmiges Kraftlinienfeld entsteht. Um diesen Eisenkern dreht sich um zwei Spitzen ein rechtwinkeliger Aluminiumrahmen, der mit zahlreichen Windungen dünnen Drahtes bewickelt ist. Durch zwei Spiralfedern aus Bronze, von denen die eine sich oberhalb, die andere sich unterhalb des Eisencylinders befindet, wird der Strom in die bewegliche Spule ein- und ausgeführt. Gleichzeitig wird durch die elastische Kraft dieser Federn die Nulllage des mit dem Aluminiumrahmen verbundenen Zeigers bestimmt und der ablenkenden Kraft des Magneten auf die vom Strome durchflossenen Windungen der beweglichen Spule entgegengewirkt.

Am oberen Ende dieser beweglichen Spule ist ein halbkreisförmiges Segment mit vielen Gewindelöchern angebracht. In diese Löcher sind so viele Schräubchen verschiedenen Gewichtes eingeschraubt, dass der Schwerpunkt des aus Rahmen und Zeiger bestehenden drehbaren Systems genau in die durch die beiden Spitzen bestimmte Drehachse verlegt wird. Diese Ausgleichung des Gewichtes ist Ursache, dass der Stromzeiger in jeder Lage gebraucht werden kann, also keinerlei sorgsame Aufstellung erfordert.

Der Zeiger aus Aluminium ist vorn in eine feine Schneide umgearbeitet, und unter der Skala befindet sich ein Spiegel, sodass parallaktische Ablesungsfehler so gut wie ausgeschlossen sind. (Vergl. Fig. 106.)

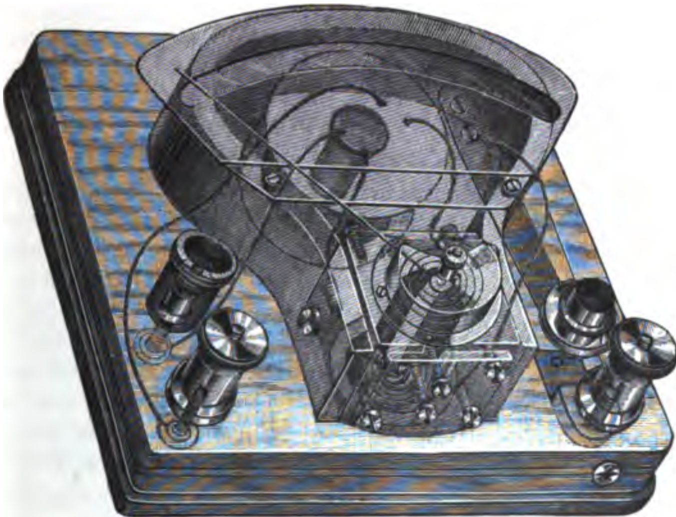


Fig. 106. Transportabler Präzisionsspannungsmesser von Weston.

Der Vorschaltwiderstand wird als bifilar gewickelte Rolle zwischen dem oberen Teile des Hufeisenmagneten untergebracht. Zur Bewickelung der Spule und dieses Vorschaltwiderstandes ist ganz dünner Draht aus einer Legierung mit sehr geringem Temperaturkoëffizienten verwendet. Die Instrumente sind bei 21° C. (70° Fahrenheit) richtig; eine Abweichung der Temperatur um ± 20° C. verursacht erst einen Fehler von $^1/_4$%.

Viele dieser und ähnlicher Spannungszeiger sind mit zwei Skalen versehen. Je nachdem der eine Zuleitungsdraht mit der einen oder der anderen der beiden links stehenden Klemmen versehen wird, kann man an der oberen Skala (etwa von 0 bis 150 V) oder an der unteren (von 0 bis 15 V) ablesen.

Der neben der rechtsstehenden Klemme angebrachte Knopf gestattet, das Instrument vorübergehend oder dauernd einzuschalten. Gleichzeitig dient dieser Knopf dazu, durch eine Drehung desselben den Strom in dem richtigen Sinne durch den Apparat zu senden, falls man die Verbindungsdrähte zufällig verkehrt angelegt hat.

Die Skala gestattet direkte Ablesung der Volt, die Teilung besteht in ihrer ganzen Ausdehnung aus gleichen Teilen.

Dadurch, dass die bewegliche Spule auf einem Metallrahmen befestigt ist, der sich in einem sehr starken Magnetfelde bewegt, stellt sich der Zeiger infolge der starken Dämpfung sofort ohne Schwingungen in die abgelenkte Lage ein.

Die Magneten dieser Instrumente sind ausserordentlich konstant und die mechanische Arbeit aller Bestandteile ist so vorzüglich, dass selbst bei längerem Gebrauch die Apparate als unveränderlich angesehen werden können.

Da der Widerstand sehr hoch ist und daher nur ein sehr schwacher Strom (höchstens 0,006 bis 0,015 A) durch die Windungen fliesst, kann der Weston'sche Spannungsmesser auch für Strommessungen durch Bestimmung des Spannungsunterschiedes aus den Enden eines Leiters von bekanntem Widerstande verwendet werden.

Für geringere Stromstärken sind genau in derselben Anordnung, wie sie die Spannungszeiger aufweisen, auch Strommesser gebaut worden, und zwar befindet sich der kleine Widerstand, zu dem die Spule im Nebenschluss liegt und an dessen Enden der Spannungsunterschied bestimmt wird, mit innerhalb des Schutzkastens. Die Skala ist dann nach Ampère geteilt.[1])

In der hier beschriebenen Anordnung können diese Instrumente nur für Gleichstrom und in grösserer Entfernung von starken Magnetfeldern benutzt werden.

b) Präzisions-Spannungs- und Strommesser von Siemens & Halske.

Auch die deutsche Industrie, die sich mit der Herstellung von Messinstrumenten beschäftigt, hat seit dem Jahre 1896 energisch die von Weston gezeigten Wege weiter verfolgt und eine Reihe geradezu mustergiltiger Typen von Apparaten geschaffen.

Fig. 107 zeigt, in der Mitte durchbrochen, die Einrichtung, wie sie Siemens & Halske neuerdings ihren Präzisionsmessinstrumenten gegeben haben.[2]) Die einzelnen, besonderen Zwecken dienenden

---

[1]) In Deutschland sind die vorzüglichen Weston'schen Instrumente durch E. Mohr, Berlin, Köpenicker Strasse 154, zu beziehen.

[2]) Man findet ausführliche Mitteilungen in dem Aufsatz von Raps: Die Präzisionsmessinstrumente von Siemens & Halske, ETZ 1896, Bd. XVII, S. 264 u. s. f.

Typen unterscheiden sich nur durch die auf den Spulen aufgebrachten Windungen und durch die Federn.

Um Ausschläge zu erhalten, die den Stromstärken, die durch die Windungen gehen, streng proportional sind, ist eine Magnetform gewählt, die den Weg der Kraftlinien aus den Polschuhen zu dem centrischen Eisenkern streng symmetrisch macht. Durch eine besondere Art der Magnetisierung der Dauermagnete ist eine sehr gleichmässige Verteilung des Magnetismus in den Polschuhen erreicht worden. Die Centrierung der Achse, Spule und des weichen Eisenkernes ist auf das sorgfältigste durch besondere mechanische Kunstgriffe bei der Herstellung erreicht. Die Federn, deren Torsionselastizität dem elektromagnetischen Drehungsmoment das Gleichgewicht hält, und die gleichzeitig zur Zu- und Abführung der zu messenden Ströme dienen, sind aus besonderen Legierungen hergestellt, und zeigen weder elastische Nachwirkung, noch irgend welche Veränderung ihrer Eigenschaften durch langdauernde Temperaturerhöhung.

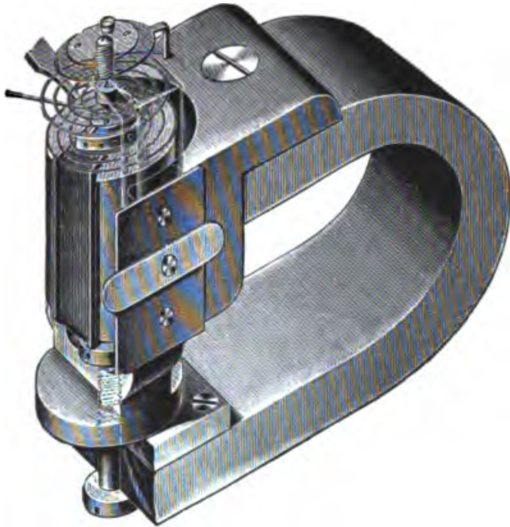


Fig. 107. Einrichtung der Präzisions-Messinstrumente von Siemens & Halske.

Da der Rahmen, auf den die bewegliche Spule aufgewickelt ist, aus Kupfer besteht und in sich geschlossen ist, hat das Instrument vorzügliche Dämpfung. Der Zeiger kommt fast augenblicklich zur Ruhe.

In Fig. 108 ist ein für Laboratoriumszwecke hergestelltes Milli-Volt- und Ampèremeter abgebildet. Ein Teilstrich entspricht einem Strome von 0,001 Ampère oder 0,001 Volt. — Der Widerstand des Instrumentes entspricht entweder 1 Ohm, 3 Ohm oder 100 Ohm, sodass man die Apparate genau in derselben Weise benutzen kann, wie wir dies früher bezüglich der Torsionsgalvano-



Fig. 108. Präzisions-Volt- und Ampèremeter für Laboratoriumszwecke von Siemens & Halske.

meter beschrieben haben. Diese Instrumente bedürfen aber keiner sorgsamen Aufstellung und sind von Temperatur und äusseren Einflüssen fast völlig unabhängig.

Um den Spannungs-Messbereich weiter ausdehnen zu können, werden aus Mangan hergestellte Vorschaltwiderstände benutzt, die z. B. bei dem Instrumente von 1 Ohm Widerstand bei einer Grösse von

9 Ω	Messungen	bis	1,5	Volt
99 »	»	»	15	»
999 »	»	»	150	»
9999 »	»	»	1500	»

gestatten.

Fig. 109 stellt einen solchen Vorschaltwiderstand dar.

Für die Strommessungen werden Nebenschlüsse benutzt (Fig. 110 zeigt einen solchen, der bis 30 A verwendbar ist) von

$\frac{1}{9}$ Ω	für	Messungen	bis	1,5	A
$\frac{1}{99}$ »	»	»	»	15	»
$\frac{1}{999}$ »	»	»	»	150	»
$\frac{1}{9999}$ »	»	»	»	1500	»

Diese Nebenschlüsse können ohne Zuhilfenahme von Drähten sofort eingeschoben werden.

Für die Messung von Stromstärken über 300 Ampère werden Nebenschlusswiderstände aus Manganrohr mit Paraffinkühlung verwendet. Ausserdem wird noch durch eine



Fig. 109. Vorschaltwiderstand für Spannungsmessungen.



Fig. 110. Nebenschluss für Strommessungen.

Kupferschlange ein Strom kaltes Wasser gesendet, um zu verhüten, dass das Paraffin zum Kochen kommt.

In Fig. 111 ist ein solcher Nebenschluss für hohe Stromstärken abgebildet.

Infolge ihrer hohen Empfindlichkeit können diese Instrumente auch für Nullmethoden an Stelle des Galvanometers, z. B. bei Messungen mit der Wheatstone'schen Brücke oder mit dem Kompensator verwendet werden.

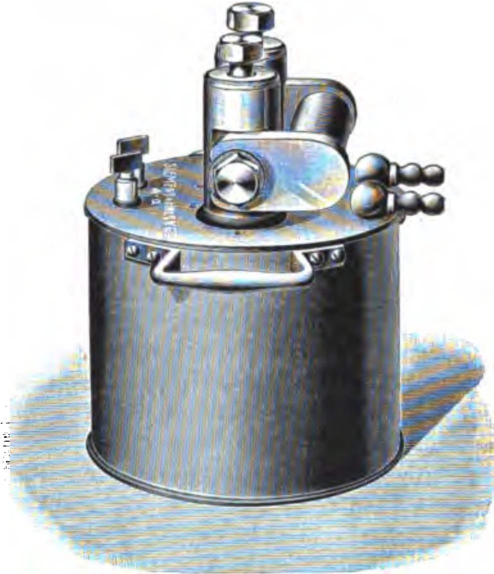


Fig. 111. Nebenschlusswiderstand für sehr grosse Stromstärken.

Nach demselben Prinzip und in der Hauptsache mit derselben Einrichtung werden auch Schaltbrettinstrumente gebaut. Die Einrichtung ist genau dieselbe, wie bei den Laboratoriumsinstrumenten, sie werden jedoch mit einem dicken Eisengehäuse umgeben, welches sie vor dem Eindringen störender Kraftlinien schützt, die etwa von benachbarten Magneten oder Starkstromleitungen ausgehen könnten.

Fig. 112 stellt ein derartiges Voltmeter, Fig. 113 ein Ampèremeter dar.





Fig. 112. Fig. 113.
Präzisions-Schaltbrettinstrumente.

Für die Ampèremeter wird der erforderliche Nebenschlusswiderstand bei einem Messbereich bis 100 A gleich mit in das Ge-

häuse eingebaut. Für noch grössere Stromstärken werden die Nebenschlusswiderstände besonders beigegeben.

Auch von mehreren anderen Firmen werden unter dem Namen von Präzisionsinstrumenten Schaltbrettmessapparate unter Benutzung des Prinzips des d'Arsonval-Galvanometers hergestellt.

5. Die Hitzdrahtvoltmeter.

Messinstrumente, deren Angaben auf der Verlängerung eines vom Strome durchflossenen Drahtes beruhen, haben vor den auf elektromagnetischen und elektrodynamischen Prinzipien beruhenden Instrumenten den grossen Vorteil, dass benachbarte Magnetfelder ihre Angaben nicht beeinflussen, und dass sie für Gleichstrom und für Wechselstrom gleich gut verwendbar sind. Die neuere Anordnung, die von A. Asch in Firma Hartmann & Braun (Bockenheim-Frankfurt a. M.) herrührt, ist gegenüber der alten Einrichtung des Hitzdrahtvoltmeters von Cardew wesentlich vereinfacht und erheblich vervollkommnet. Viele Tausend solcher Apparate sind jetzt bereits in grösseren und kleineren, zumal in Wechselstromanlagen mit bestem Erfolge in Betrieb.

Ein aus einer Legierung von Platin und Silber bestehender dünner Draht ist einerseits am Punkte a und anderseits an einer Regulierschraube s befestigt. (Vergl. Fig. 114.) Durch diesen Draht fliesst der Strom, der gemessen werden soll. Da der Widerstand dieses dünnen Drahtes d gross ist, wird der Draht durch die Stromwärme des durchgehenden Stromes erwärmt. Der Draht dehnt sich aus und senkt sich in der Mitte, da seine Enden unbeweglich sind.

Fig. 114. Einrichtung des Hitzdraht-Voltmeters von Hartmann & Braun.

In der Mitte dieses Drahtes und bei q ist ein dünner Messingdraht m befestigt, an dem ein Faden angehängt ist. Der Faden ist um die auf der Achse des Zeigers befestigte Rolle c herumgeschlungen und wird durch eine Blattfeder p gespannt. Die Durchbiegung der Drähte d und m wird auf diese Weise auf einen Zeiger z übertragen, der vor einer empirisch geteilten Skala spielt.

Die Zeigerachse ist sorgfältig in Steinen gelagert, sodass die Reibung nur äusserst gering ist.

Unmittelbar über dem Arbeitsdrahte d befindet sich ein aus Aluminium hergestelltes kleines Schutzdach, um der Entstehung aufsteigender Luftströme möglichst vorzubeugen.

Die Platte, auf der sich die sorgsam isolierten Befestigungspunkte des Drahtes s und a befinden, ist aus zwei Teilen zusammengesetzt; sie besteht aus einer Eisenplatte und einer Messingplatte. Die Breiten dieser beiden Stücke sind derart bemessen, dass der Ausdehnungskoëffizient der zusammengesetzten Platte dem des Drahtes d genau gleich ist. Auf diese Weise wird verhindert, dass eine Temperaturänderung der Umgebung des Apparates eine Veränderung der Angaben des Instrumentes, durch Vergrösserung oder Verkleinerung des Abstandes der Punkte s und a, bewirkt.

Um Schwankungen beim Einstellen des Zeigers möglichst zu verhüten und das Instrument möglichst aperiodisch zu machen, ist an der Zeigerachse noch eine Metallscheibe angebracht, die sich zwischen den Polen eines kräftigen Magneten bewegt. Dadurch wird auch die Zeigerstellung gegen Schwankungen und Erschütterungen so unempfindlich, dass man die Instrumente selbst auf Schiffen gut verwenden kann.

In Fig. 115, die das Äussere des Apparates erkennen lässt, ist diese Scheibe und rechts unten auch der Magnet zu sehen.

Soll das Instrument für höhere Spannungen benutzt werden, so wird dem Arbeitsdrahte noch ein induktionsfreier Widerstand aus Konstanten vorgeschaltet.

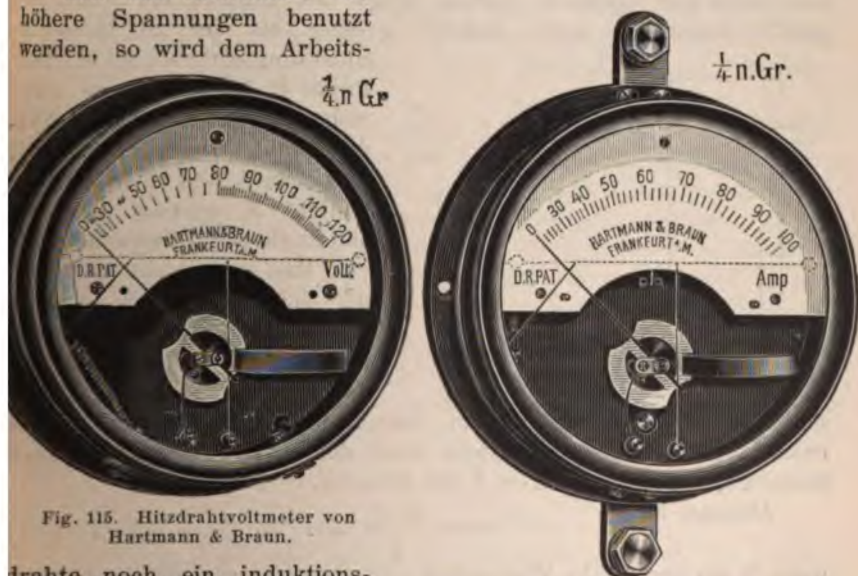


Fig. 115. Hitzdrahtvoltmeter von Hartmann & Braun.

Fig. 116. Hitzdrahtstrommesser von Hartmann & Braun.

Auch **Stromzeiger** werden nach demselben Prinzipe gebaut. Fig. 116 zeigt z. B. ein derartiges Hitzdrahtampèremeter. Da dann

der ganze zu messende Strom durch den Arbeitsdraht hindurch gehen muss, ist selbstverständlich ein gewisser Spannungsverlust durch den Apparat unvermeidlich; derselbe ist jedoch gering und liegt zwischen 0,2 und 0,3 Volt. Durch auswechselbare Bleisicherungen, die derartigen Instrumenten vorgeschaltet werden, werden sie vor Überanstrengung geschützt.

Da diese beiden Arten von Messvorrichtungen ebenso gut für Gleichstrom wie für Wechselstrom brauchbar sind, kann man sie mit Gleichstrom aichen, und die Angaben dann ohne weiteres für Wechselstrom benutzen.

6. Messung von Spannungen und von elektromotorischen Kräften nach der Kompensationsmethode mit dem Potentiometer.

Zwischen zwei Punkten a und b eines Leiters bestehe ein Spannungsunterschied e, den wir bestimmen wollen. — Wir senden zu diesem Zwecke durch einen Draht CD, der genau cylindrisch ist und der überall zwischen gleichweit voneinander abstehenden Querschnitten genau gleichen Widerstand besitzt, einen konstanten Strom von beliebiger Stärke J, sodass längs des Drahtes ein Potentialgefälle hergestellt wird, welches grösser als der zu messende Spannungsunterschied ist. Den Punkt B verbindet man nunmehr mit dem einen Endpunkt D des Drahtes (vergl. Fig. 117). Zwischen A und einen Schleifkontakt K schaltet man ein empfindliches Galvanometer G.

Fig. 117. Schaltung bei Spannungsmessung nach der Kompensationsmethode.

Man verschiebt nunmehr den Schleifkontakt K so lange auf CD, bis das Galvanometer keinen Ausschlag zeigt. Alsdann ist der Spannungsunterschied zwischen A und B dem zwischen D und K gleich. Man misst nunmehr, etwa an einem unter dem Draht CD angebrachten Massstab, die Länge DK = l des Drahtes.

Alsdann ist

$$e = \frac{k \cdot l}{q} \cdot J \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

wenn k der spezifische Widerstand und q der Querschnitt des Drahtes ist, und mit J die Stärke des Stromes bezeichnet wird, der durch den Draht fliesst.

Hierauf wiederholt man den Versuch, ersetzt jedoch die zu messende Spannung e durch ein Normalelement, etwa ein Clarkelement, dessen EMK e′ genau bekannt ist.

Diesmal wird man eine Drahtlänge l′ zwischen D und K einschalten müssen, wenn das Galvanometer abermals Stromlosigkeit anzeigen soll. Nunmehr ist:

$$e' = \frac{k \cdot l'}{q} \cdot J.$$

Durch Division ergiebt sich:

$$\frac{e}{e'} = \frac{l}{l'}, \text{ oder: } e = e' \cdot \frac{l}{l'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

Da nun e′ bekannt ist und l und l′ gemessen worden sind, wird nach Gleich. 7) die gesuchte Spannung e gefunden.

Diese Methode ist sehr einfach und giebt äusserst genaue Resultate, wenn während der aufeinanderfolgenden Beobachtungen J unverändert geblieben ist, und wenn der Draht wirklich genau überall gleichen Widerstand besitzt.

Besonders eignet sich dieses Verfahren zur Messung der EMK von Elementen, deren Spannung zwischen den Polklemmen sonst sehr verschieden ausfällt, je nach der Stromstärke, mit der das Element beansprucht wird.

Um die Stromstärke J, die den Messdraht durchfliesst, genau unveränderlich erhalten zu können, empfiehlt es sich, in den Stromkreis, der durch die Batterie B und den Messdraht gebildet wird, einen Regulierwiderstand R und einen empfindlichen Strommesser einzuschalten.

Da Strommesser jedoch zumeist nicht empfindlich genug sind, um sehr kleine Schwankungen der Stromstärke noch mit Sicherheit bemerken zu können, ist es zweckmässiger, mit einem empfindlichen Spannungsmesser (Torsionsgalvanometer, Präcisionsspannungsmesser von Weston oder Millivoltmeter von Siemens & Halske) den Spannungsunterschied zwischen den Enden C und D des Drahtes zu messen.

Nehmen wir nun an, dass während der ersten der beiden Messungen, bei der das Galvanometer auf Null zeigte, als man die Drahtlänge l eingeschaltet hatte, die Spannung zwischen den Punkten C und D gleich S gemessen sei, dann war die zu messende Spannung e gleich

$$e = \frac{S \cdot l}{L},$$

wenn L die ganze Drahtlänge CD bezeichnet.

Herrschte bei der zweiten Messung, bei der mit der EMK e′ des Normalelementes Stromlosigkeit im Galvanometer erzielt wurde, als die Länge l′ des Drahtes eingeschaltet worden war, an den Enden CD des Drahtes die Spannung S′, so ist

$$e' = \frac{S' \cdot l'}{L}.$$

In diesem Falle ergiebt sich durch Division:

$$\frac{e}{e'} = \frac{l}{l'} \cdot \frac{S}{S'}, \text{ oder: } e = e' \cdot \frac{l}{l'} \cdot \frac{S}{S'} \quad \ldots \quad 8)$$

Verwendet man, wie dies jetzt wohl allgemein üblich ist, Akkumulatoren als Stromquelle, so wird bei rasch hintereinander folgenden Beobachtungen meist ziemlich genau S = S′ sein. Bei feineren Messungen, oder wenn die angewendete Stromstärke J verhältnismässig gross ist, darf man jedoch auf die Kontrolle des Spannungsunterschiedes S an den Enden des Messdrahtes nicht verzichten.

Bei den für den praktischen Gebrauch dieser Methode fertig vorgerichteten Apparaten wird die Stromstärke J oder die Drahtlänge L meist so gewählt, dass etwa gerade eine Drahtlänge von 100 *mm* einem Potentialunterschiede von 1 Volt entspricht. Alsdann kann man unmittelbar am Drahte, wenn man Zehntel Millimeter am Drahte abliest, auf Tausendel Volt genau messen.

Durch Veränderung des Regulierwiderstandes R, Vergrösserung oder Verkleinerung der Elementenzahl der Akkumulatorenbatterie oder durch Veränderung der Drahtlänge L kann man es jederzeit so einrichten, dass z. B. das Clark-Normalelement bei 15° C. gerade kompensiert wird, wenn man eine Drahtlänge von 143,3 *mm* einschaltet[1]. Alsdann entspricht 1 *mm* Drahtlänge gerade $^1/_{100}$ Volt. Apparatezusammenstellungen, die für die Benutzung dieser Methode besonders eingerichtet sind, nennt man **Kompensatoren** oder **Potentiometer**[2]. Bei diesen Apparaten wird jedoch zumeist die Kompensation auf Stromlosigkeit nicht durch Drahtlängen, sondern durch Einschaltung genau abgeglichener Widerstände eines Widerstandskastens bewirkt.

Es ist ferner ohne weiteres ersichtlich, dass man durch Messung der Spannungsunterschiede an den Enden eines Widerstandes von bekannter Grösse mit dem Kompensator auch Stromstärken messen kann.

Zweckmässig benutzt man ferner die an den Enden zu vergleichender, von demselben Strome durchflossener Widerstände auftretenden Spannungen, um z. B. Normalwiderstände unter Belastung mit den im Betriebe vorkommenden Stromstärken mit einander hinsichtlich ihrer Grösse zu vergleichen.

Zunächst scheint es, als ob für die Messung von EMKräften die obere Grenze des Messbereiches durch die EMK der Batterie B (Fig. 114) gezogen sei. Dies ist aber durchaus nicht der Fall.

---

[1] Nach **Kahle** beträgt die EMK des Clark-Elementes bei 15° C. genau 1,433 Volt und vermindert sich für je 1° C. um 0,00012.

[2] Der in Deutschland verbreitetste Apparat dieser Art ist der Kompensator von **Feussner**.

Wäre z. B. die zu messende EMK n mal grösser, als die EMK, die man mit dem fertigen Apparat noch bequem messen kann, so legt man die zu messende EMK an einen bekannten sehr grossen Widerstand, z. B. 100 000 Ohm und misst die Spannungsdifferenz mit dem Kompensator, die an einem bekannten Bruchteil dieses grossen Widerstandes, z. B. an den Enden von 100 Ohm, auftritt. Im vorliegenden Beispiele würde das Tausendfache der am Kompensator gemessenen die gesuchte Spannung sein.

7. Beschreibung eines für praktische Messung eingerichteten Kompensators.

Aus der grossen Zahl zweckmässiger Konstruktionen von Potentiometern für das elektrotechnische Laboratorium wählen wir die durch Einfachheit, Leichtigkeit der Handhabung und Billigkeit sich auszeichnende Einrichtung, die von Dr. R. Franke[1]) in Hannover hergestellt wird.

Hinter dem Schleifdraht 0 bis 10 (vergl. Fig. 118), der über einer hundertteiligen, kreisförmigen Skala ausgespannt ist, können durch Verstellung der Kurbel K_1 nach und nach 14 Drähte von genau gleichem Widerstande wie der Schleifdraht eingeschaltet werden. An die Klemme H dieser Widerstandskombination ist eine Hilfsbatterie (ein Akkumulator von etwa 1,9 Volt Spannung) und ein Regulierwiderstand R_0, der sehr feine Änderungen zulässt, angeschlossen. Auf dem Messdraht ist ein Schleifkontakt C verschiebbar. Das Normalelement N ist durch die Klemmen S einerseits an die Kurbel, K_1 anderseits an das Galvanometer G und den Schleifkontakt C angeschlossen.

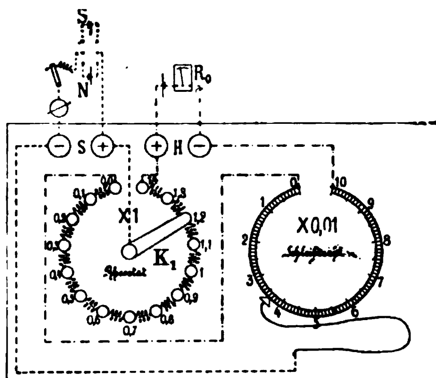


Fig. 118. Schaltung am Franke'schen Kompensator.

Benutzt man als Normalelement ein Clark-Element, dessen EMK bei 15° C. gleich 1,433 ist, so stellt man zunächst Kurbel K_1 auf den Kontakt 14 und den Schleifkontakt auf 33 und regelt durch Veränderung des Widerstandes Ro die Stromstärke so, dass das Galvanometer G stromlos wird. Nunmehr lassen sich zwischen 0,1

---

[1]) Vergl. ETZ 1897, S. 318.

und 1,5 Volt gelegene Spannungen ohne weiteres mit dem Apparate kompensieren. Man schaltet die zu messende Spannung zwischen die Klemmen bei S und stellt mit Hilfe des Umschalters die Verbindung mit dem Galvanometer G her. Durch Verschieben der Kurbel K_1 und des Gleitkontaktes C macht man aufs neue das Galvanometer stromlos und liest bis auf das Komma ohne jede Korrektion die gesuchte Spannung an den Kurbeln des Apparates ab.

Für die Messung sehr kleiner Spannungen dient folgende Vorrichtung. Man legt zum Messdraht von dem Widerstande

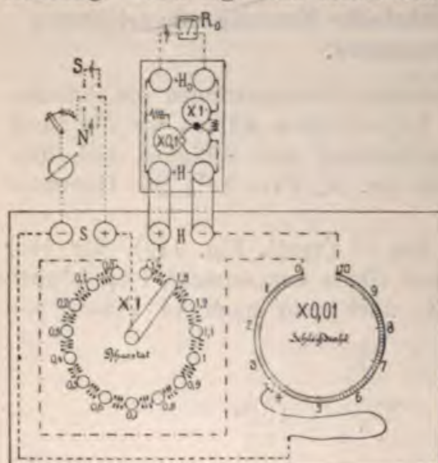


Fig. 119. Schaltung für Messung sehr kleiner Spannungen.

$W_1 = 15 \times$ Widerstand des Schleifdrahtes von 0 bis 10 einen Nebenschlusswiderstand W_1, und macht etwa:

$$W_2 = \frac{W_1}{9}, \text{ oder } W_2 = \frac{W_1}{99}.$$

Da nun aber der Widerstand des ganzen an die Batterie anzulegenden, nunmehr verzweigten Stromkreises wiederum ungeändert W_1 sein soll, muss man noch einen Widerstand W_3 zufügen, sodass der Widerstand des verzweigten Widerstandes vermehrt um W_3 wiederum W_1 ergiebt. Es muss also:

$$W_1 = \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2} + W_3$$

sein.

Daraus folgt, dass

$$W_3 = \frac{9}{10} W_1 \text{ bezw. } W_3 = \frac{99}{100} W_1$$

gewählt werden muss.

Im Hauptstromkreis bleibt also die Stromstärke ungeändert, während das Potentialgefälle im Messdrahte auf $^1/_{10}$ oder $^1/_{100}$ herabgesetzt wird.

Der Nebenschluss und Zusatzwiderstand sind in besonderen Kasten (vergl. Fig. 119) untergebracht und werden mit Hilfe dicker Kupferschienen in der aus Fig. 119 ersichtlichen Weise mit dem Apparate verbunden. Die Aichung geschieht, während der Stöpsel an den in den Figuren 119 und 122 zu erkennenden Stellen $\times 1$ steckt, während also der Nebenschluss und Zusatzwiderstand noch nicht eingeschaltet sind. Ist die Aichung geschehen, so wird der-

selbe Stöpsel in die Stelle $\times$ 0,1 eingesteckt, und Nebenschluss und Zusatzwiderstand kommen zur Wirkung.



Fig 120. Äussere Ansicht des Franke'schen Kompensators.

Soll eine grössere, etwa zwischen 1,5 und 1500 Volt gelegene Spannung gemessen werden, so verwendet man (vergl. Fig. 121) einen Spannungsteiler, der in die Stufen:

90 Ω, 900 Ω, 9000 Ω, 90 000 Ω

gegliedert ist. Die hohe Spannung ist mit den Klemmen h S auf

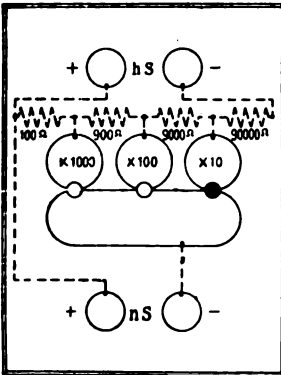


Fig. 121. Hilfswiderstand für Messung hoher Spannungen.

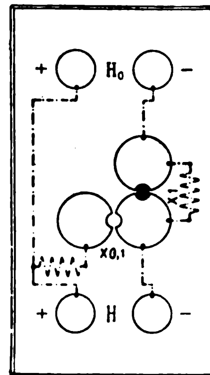


Fig. 122. Nebenschluss und Vorschaltwiderstand für Messung kleiner Spannungen.

100 000 verbunden und von diesem Widerstand zu den Klemmen n S

abgezweigt, welche mit dem Apparat (Klemmen S) in Verbindung stehen. Es lässt sich nun stets die Spannung so unterteilen, dass an den Kurbeln des Apparates eine Spannung auftritt zwischen 0,1 bis 1,5 Volt. Auf diese Weise lassen sich Spannungen bis 1500 Volt messen, wobei die an den Kurbeln des Apparates abgelesene Spannung nur mit dem Stöpselwert (× 10, × 100, × 1000) zu multiplizieren ist.

Für sehr grosse Genauigkeit ist noch ein grösserer Apparat, Fig. 123, konstruiert, welcher ausser Schleifdraht und Kurbel-

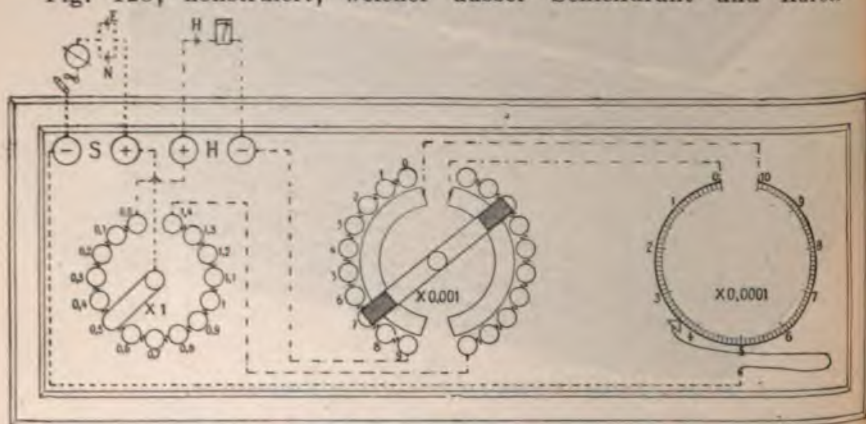


Fig. 123. Kompensator für feinere Messungen.

rheostat noch eine Doppelkurbel enthält, so dass man noch um eine Decimale genauer messen kann, der Grundgedanke ist derselbe geblieben.

Die äussere Ansicht und Einrichtung des Franke'schen Kompensators kann aus der Fig. 120 ersehen werden.

Die Empfindlichkeit des Apparates hängt wesentlich von der des benutzten Galvanometers ab.

8. Das Lippmann'sche Kapillarelektrometer.

Zur Messung sehr kleiner EMKräfte, oder als Nullinstrument in der Wheatstone'schen Brücke, dem Kompensator und ähnlicher Vorrichtungen bedient man sich anstatt des Galvanometers auch des Lippmann'schen Kapillarelektrometers. Zumal in den elektrochemischen Laboratorien ist dieser Apparat äusserst beliebt. Das Instrument gestattet bei zweckmässiger Einrichtung mit Sicherheit noch $^1/_{10000}$ Volt zu erkennen.

Die Wirksamkeit dieses Apparates beruht auf der Thatsache, dass die Oberflächenspannung einer mit verdünnter Schwefelsäure

in Berührung stehenden Quecksilberoberfläche durch die Polarisation durch Wasserstoff abnimmt, wenn die an der Berührungsstelle bestehende Potentialdifferenz durch Auftreten einer EMK irgendwie geändert wird. Die Abnahme der Oberflächenspannung ist, so lange die wirksame EMK unter $^1/_{10}$ Volt bleibt, der Polarisation proportional.

Schaltet man also zwischen zwei Quecksilberelektroden von verschiedenen Querschnitten eine Säule von Schwefelsäure ein, so verteilt sich die Wirkung der äusseren EMK im Verhältnis der Grösse der Berührungsflächen. Ist die eine sehr gross, die andere klein, berühren sich z. B. auf der einen Seite Quecksilber und Schwefelsäure in einem engen Kapillarrohr, so kommt die Änderung der Oberflächenspannung wesentlich nur hier zur Geltung, das Ende des Quecksilberfadens verschiebt sich in der Kapillare.

Nebenstehende schematische Zeichnung (Fig. 124) zeigt die Einrichtung des Apparates. Zwei Glasgefässe G und R sind durch ein enges Kapillarrohr miteinander verbunden. Das rechts stehende Gefäss R wird mit Quecksilber so hoch gefüllt, dass die Oberfläche des Quecksilbers in der Kapillare etwa bis zur Mitte reicht, wenn das linke Gefäss G unten in der Kugel mit Quecksilber und darüber etwa bis zum Punkte A mit verdünnter Schwefelsäure (1 : 6) gefüllt ist. In R führt man einen blanken Platindraht in das Quecksilber ein; auf der linken Seite wird ein in eine Glasröhre eingeschmolzener, oben und unten herausragender Platindraht eingebracht, sodass das untere, blanke Ende des Drahtes in das Quecksilber eintaucht und das Platin mit der Schwefelsäure nicht in Berührung kommt.

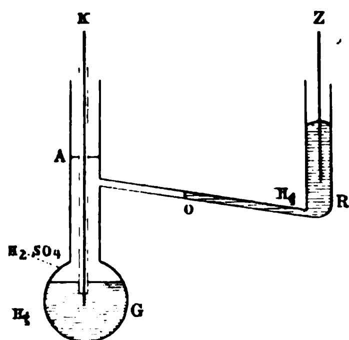


Fig. 124. Schematische Darstellung des Lippmann'schen Kapillarelektrometers.

Der negative Pol der zu messenden Spannungsdifferenz wird mit Z, der positive mit K verbunden.

Man beobachtet entweder mit einem Mikroskop die Grösse der Verschiebung des Quecksilberfadens bei O, oder man misst die Änderung des Druckes der Flüssigkeitssäule auf der linken Seite, die nötig ist, um den Quecksilberfaden wieder auf die Nullstellung zurück zu bringen.

Da das Kapillarelektrometer nur dann richtige Werte zeigt, wenn es stets, mit Ausnahme des Augenblicks der Messung, in sich geschlossen bleibt, so schaltet man zwischen die zu messende EMK und das Elektrometer einen Elektrometerschlüssel ein. Es ist

dies ein federnder Metallbügel, der für gewöhnlich die beiden aus Z und K herausragenden Drähte leitend miteinander verbindet und nur im Augenblick der Beobachtung durch Niederdrücken eines Knopfes die zu messende EMK einschaltet.

Die Abbildung Fig. 125 stellt die von Ostwald herrührende Form des Kapillarelektrometers dar. Der Apparat ist auf einem Brettchen befestigt, das durch eine Stellschraube um ein Scharnier gedreht werden kann. Die Verschiebung des Quecksilberfadens in der ungefähr 0,5 *mm* weiten Kapillare wird durch eine Lupe L oder ein kleines Mikroskop beobachtet.

Je mehr die Neigung der Kapillare sich der Horizontalen nähert, um so empfindlicher wird das Instrument. Vor Beginn der Messung

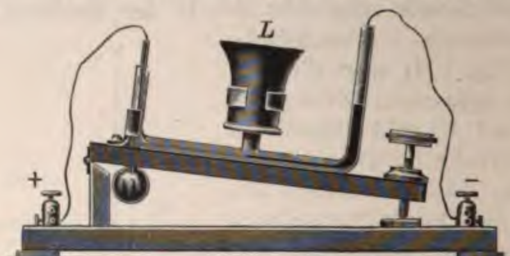


Fig. 125. Ostwald'sche Form des Kapillarelektrometers.

werden einige Tropfen Quecksilber zum Ausfliessen gebracht, damit die Quecksilberkuppe von völlig frischem, reinem Quecksilber gebildet wird. Um das Instrument zu aichen, schliesst man eine bekannte EMK von der Grösse E, etwa einen Akkumulator, durch einen grossen Widerstand W (10000 Ω) und zweigt von den Widerständen w_1 (etwa 10 Ohm), w_2 (20 Ohm), w_3 (30 Ohm) u. s. w. nach den Klemmen des Apparates nach und nach ab, und beobachtet die Verschiebungen a_1, a_2, a_3 $\cdots$ der Quecksilberkuppe. Unterhalb $^1/_{10}$ Volt gilt streng die Proportion:

$$a_1 : a_2 : a_3 : \cdots = w_1 : w_2 : w_3 : \cdots$$

Alsdann entspricht eine Verschiebung der Quecksilberkuppe in der Kapillare um a Skalenteile einem Potentialunterschiede Δ.

$$\Delta = a \cdot \frac{E \cdot w_n}{a_n \cdot W} \text{ Volt.}$$

9. Die Aichung der Voltmeter.

Jedes Instrument, welches zum Messen schwacher Ströme geeignet ist, kann auch zur Messung von Spannungen benutzt werden, sofern der Widerstand im Stromkreise des Instrumentes so gross ist, dass der Potentialunterschied, dessen Grösse bestimmt werden

soll, durch das Einschalten des Spannungsmessers nicht merklich geändert wird.

Zumeist kann der erforderliche Widerstand dadurch hergestellt werden, dass man die Spule eines Strommessers durch eine aus vielen Windungen dünnen Drahtes hergestellte Spule ersetzt. Erreicht man auf diese Weise noch nicht die erforderliche Grösse des Widerstandes, so wird noch eine besondere Spule mit dem nötigen Widerstande neben oder im Apparate angebracht. Diese Ergänzungsspule wird jedoch bifilar gewickelt, um zu verhüten, dass dieselbe magnetische Wirkungen ausübt.

Die Skala der Voltmeter wird unmittelbar in Volt geteilt. Die Aichung findet meist in der Weise statt, dass man den zu aichenden Spannungsmesser und ein empfindliches Galvanometer von hohem Widerstande in Parallelschaltung an zwei Punkte legt, deren Potentialdifferenz innerhalb der gewünschten Grenzen geändert werden kann, und dass man nun in derselben Weise verfährt, die wir für die Aichung der Strommesser beschrieben haben (vergl. Kap. X, Abschn. 3, S. 192).

Die nachstehende Abbildung (Fig. 126) zeigt z. B. eine Einrichtung, die für solche Zwecke brauchbar ist. Mit den Polklemmen

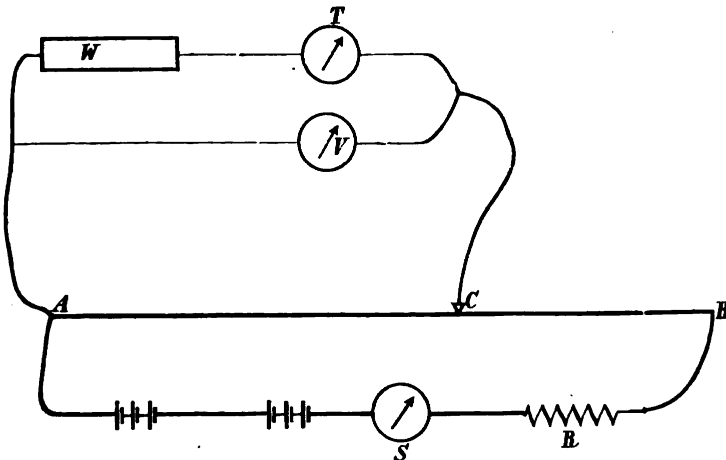


Fig. 126. Anordnung für die Aichung eines Voltmeters.

einer geeigneten Elektrizitätsquelle (am besten einer Akkumulatorenbatterie oder einer elektrischen Maschine), deren Klemmenspannung grösser ist, als die höchste Spannung, die man auf der Skala verzeichnen will, verbindet man einen Draht A B. Von dem zu aichenden Spannungsmesser V und dem Torsionsgalvanometer T mit einem Vorschaltwiderstand W führt man einerseits Verbindungsdrähte nach A,

anderseits Verbindungsdrähte zu einer Klemme C, die man nach Bedarf an verschiedenen Stellen des Drahtes AB anlegen kann.

Für möglichst viele Punkte der aus gleich weit abstehenden Teilstrichen bestehenden Hilfsskala des Spannungsmessers bestimmt man die zugehörige Spannung am Torsionsgalvanometer, indem man C an verschiedenen Punkten des Drahtes AB anlegt. Da die Spannungsmesser meist dauernd in die Leitungen eingeschaltet sind, muss man vor jeder neuen Beobachtung die Spannung etwa 5 Minuten lang unverändert erhalten, damit die Drähte der Spule und des Vorschaltwiderstandes die der herrschenden Stromstärke entsprechende Temperatur annehmen. Hierauf verwendet man das bei der Aichung der Strommessung benutzte graphische Verfahren, um die Stellen zu ermitteln, an welchen die gewünschten, den einzelnen, ganzen Volt entsprechenden Teilstriche anzubringen sind.

10. Elektromagnetische Spannungszeiger.

Die meisten Spannungsmesser unterscheiden sich, wie bereits erwähnt, nur dadurch von den Stromzeigern, dass an Stelle der dickdrähtigen Spule der Ampèremeter eine aus vielen Windungen dünnen Drahtes hergestellte Spule verwendet wird. Dahin gehören z. B. die älteren Spannungsmesser von Hummel, von Siemens & Halske, der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, von Hartmann & Braun und vielen anderen. Der Widerstand, der innerhalb des Wickelungsraumes der Spule nicht untergebracht werden kann, wird als Zusatzwiderstand in einem gutgelüfteten Hohlraum hinter oder neben dem Messinstrumente angeordnet.[1])

Äusserlich unterscheiden sich daher diese Spannungsmesser nur dadurch von den Strommessern, dass die Skala nach Volt statt nach Ampère geteilt ist. Manche Konstruktionen werden jedoch aus technischen Gründen vorzugsweise für Spannungsmesser, andere wieder ausschliesslich für Strommesser angewendet.

Für genaue Messungen werden neuerdings fast ausschliesslich die nach dem Prinzipe der Deprez-D'Arsonval-Galvanometer gebauten Präcisions-Voltmeter verwendet (vergl. dieses Kap., Abschn. 4, S. 206).

a) Spannungszeiger von Fischinger.

In einer flachen Spule h (Fig. 127) ist ein eigentümlich geformtes dünnes Eisenblech a um eine exzentrisch angeordnete Achse drehbar. An dieser Achse befindet sich gleichzeitig ein Zeiger, der auf einer

[1]) Bei einem Spannungsmesser für Spannungen bis 120 V hat z. B. die Spule des Messapparates eine Drahtwicklung von 160 ω Widerstand; der Vorschaltwiderstand ist aus Konstanten-Draht hergestellt und hat 1230 ω Widerstand.

Skala spielt, und ein kleines Gegengewicht. Durch die Verstellung dieses Gewichtes kann der Schwerpunkt des drehbaren Systemes genau in die Achse verlegt werden. An der Achse ist ferner das eine Ende einer Spiralfeder befestigt, deren elastische Kraft der magnetischen Anziehung der Spule auf das Eisenblech entgegenwirkt.

Für transportable Spannungsmesser ist das andere Ende dieser Feder an einem beweglichen Zeiger g befestigt, den man so lange dreht, bis der mit der Achse verbundene Zeiger wieder in seine Ruhelage zurückgekehrt ist (ganz ähnlich wie dies beim Torsionsgalvanometer und beim Elektrodynamometer von Siemens & Halske der Fall ist). Für stationäre Instrumente dient der verschiebbare Zeiger g nur zur Regelung der Spannung der Spiralfeder beim Aichen.

b) Spannungszeiger von Imhoff (Fig. 128).

Um eine ausserhalb der Mitte einer Spule befindliche Achse ist ein nach der Form der Spulenwand gekrümmtes dünnes, weiches



Fig. 127.
Spannungsmesser von Fischinger.



Fig. 128.
Spannungsmesser von Imhoff.

Eisenblech b drehbar, an dem ein Zeiger befindlich ist. In der Ruhelage ist dieses Eisenblech nahezu parallel einem zweiten in der Spule befestigten Bleche. Wenn ein Strom durch die Windungen fliesst, stossen sich beide Bleche ab, und das bewegliche Blech nähert sich gleichzeitig (in der äussersten Lage punktiert gezeichnet) mehr und mehr der Spulenwand, von der es angezogen wird.

c) Der auf dem Prinzipe des Elektrodynamometers beruhende Spannungszeiger von Siemens & Halske.

Eine horizontale, aus vielen Windungen dünnen Drahtes bestehende Spule trägt zwei Lagerpfannen; in diesen Pfannen ruhen zwei eine horizontale Gerade bildende Schneiden, um die eine zweite Spule gleicher Art drehbar ist. Durch dünne Spiralfedern erfolgt



Fig. 129. Aeltere Spannungsmesser von Siemens & Halske.

die Zu- und Abführung des Stromes zur beweglichen Rolle, ähnlich wie dies bei den sogenannten Präcisionsinstrumenten geschieht. In der Ruhelage steht die bewegliche Rolle schief. Geht nun der Strom durch beide Rollen hintereinander hindurch, so wird die bewegliche Rolle von der festen abgestossen, um so mehr, je stärker der hindurchfliessende Strom, je grösser der Spannungsunterschied der beiden Punkte ist, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll (vergl. Fig. 129).

Mit der beweglichen Rolle ist ein Zeiger verbunden, der auf einer Skala die zu messende Spannung abzulesen gestattet.

Dieses Voltmeter hat den Vorteil, dass es auch zur Messung der Spannung von Wechselströmen geeignet ist.

11. Elektrostatische Spannungszeiger für hohe Spannungen.

Auf einem ähnlichen Prinzip wie das Quadranten-Elektrometer beruht die Einrichtung dieser vorzugsweise zur Messung hoher Spannungen bei Wechselströmen bestimmten Apparate, deren Ein-

richtung aus untenstehender Fig. 130 ersehen werden kann. Zwischen zwei gleichen, festen, einander gegenüberstehenden Platten, die von dem Gehäuse sorgsam isoliert sind, befindet sich eine aus Aluminiumblech hergestellte bewegliche Platte, die oben einen Zeiger trägt, der vor einer Skala spielt und unten ein Stäbchen trägt, an dem man ein Gegengewicht verstellen kann. Die festen Platten werden mit dem einen, die bewegliche Platte wird mit dem anderen der Punkte



Fig. 130. Elektrostatischer Spannungszeiger von Siemens & Halske.

verbunden, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll. Alsdann wird die bewegliche Platte, die auf der einen Seite etwas über die festen Platten hinausragt, von letzteren angezogen, und dadurch wird das Gewicht gehoben. Der Zeiger gestattet dann, die Spannungen an einer empirisch geteilten Skala abzulesen.

Um die Wirkung zu erhöhen, werden oft auch auf dieselbe bewegliche Achse mehrere solche Aluminiumflügel aufgesetzt und entsprechend von mehreren festen Platten umgeben. Es sind dies dann die sogenannten elektrostatischen Zellenvoltmeter.

XII. Kapitel.

Die Messung der elektrischen Arbeit und Leistung. Elektrizitätszähler.

1. Indirekte Bestimmung der elektrischen Arbeit.

Bekanntlich ist die elektrische Arbeit in der Zeiteinheit oder die elektrische Leistung das Produkt $i \cdot e$ aus der Stromstärke i mal der Potentialdifferenz e (vergl. Kap. II, Abschn. 3, S. 55). Man kann daher die Stromstärke, mit der ein elektrischer Apparat betrieben wird, mit Hilfe eines Ampèremeters und den Spannungsunterschied an den Klemmen durch ein Voltmeter ermitteln und, wenigstens bei Gleichstrom, durch Multiplikation beider Grössen den Arbeitsaufwand bestimmen.

Diese Multiplikation kann jedoch bei Wechselströmen falsche Ergebnisse liefern, wenn man ohne weiteres das Produkt aus der mittleren Stromstärke und der mittleren EMK bilden und als Mass der elektrischen Arbeit ansehen wollte. Hat nämlich der Apparat, an dem oder mit dem Messungen vorgenommen werden sollen, eine merkliche Selbstinduktion, so besteht zwischen der Periode der den Strom erzeugenden EMK und der Periode des erzeugten Stromes nicht mehr Übereinstimmung, sondern es macht sich eine Phasenverschiebung zwischen beiden Wellen geltend (vergl. Kap. VIII, Abschn. 8, S. 174). Alsdann müssten diese Produkte in äusserst zahlreichen, gleich weit voneinander abstehenden Zeitpunkten einer vollen Periode gebildet und diese Produkte zusammengerechnet werden. Mit den Hilfsmitteln der elementaren Algebra ist die Ausführung dieser Operation im allgemeinen gar nicht möglich.

2. Das Wattmeter von Siemens.

Es giebt jedoch Apparate, mit deren Hilfe man das Produkt $i \cdot e$ direkt ermitteln kann. Für Gleichstrom ist das Wattmeter von Siemens sehr geeignet. Es ist dies ein Elektrodynamometer (vergl. Kap. VII, Abschn. 2, S. 157), bei dem die feste, aus vielen Windungen feinen Kupferdrahtes bestehende Rolle als Nebenschluss von hohem Widerstande an die Klemmen des Apparates gelegt wird, dessen Arbeits-

verbrauch oder Leistung bestimmt werden soll. Den Strom selbst aber, der durch den Apparat fliesst, führt man durch die aus wenigen Windungen dicken Drahtes bestehende bewegliche Spule des Dynamometers. Der Strom, der durch den hohen Widerstand der festen Spule fliesst, ist der Spannung e proportional. Der Winkel Θ, um den die Feder des Instrumentes tortiert werden muss, damit die bewegliche Spirale in ihrer ursprünglichen Gleichgewichtslage verbleibt, ist ohne weiteres dem Produkte $i \cdot e$ proportional:

$$\Theta = C \cdot i \cdot e \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

Um die Konstante C für das Instrument zu bestimmen, legt man das Wattmeter an einen Widerstand von bekannter Grösse n, durch den man einen Strom von der ebenfalls bekannten Stärke i fliessen lässt, und beobachtet den Torsionswinkel. Ist dieser a, so hat man:

$$a = C \cdot i^2 \cdot w, \text{ und daraus: } C = \frac{a}{i^2 \cdot w} \quad \ldots \quad 2)$$

3. Wattmeter von Bláthy.

Da die feste Spirale des Siemens'schen Wattmeters aus vielen Windungen besteht, besitzt sie eine merkliche Selbstinduktion und bietet infolgedessen Wechselströmen einen grösseren scheinbaren Widerstand dar, der von der Zahl der Stromwechsel abhängig ist (vergl. Kap. VIII, Abschn. 7, S. 174). Diesem Übelstande hat Bláthy dadurch zu begegnen gesucht, dass er beiden Spulen des Wattmeters nur eine ganz geringe Zahl von Windungen gegeben hat, sodass deren Selbstinduktion vernachlässigt werden kann. Er schaltet vor die bewegliche Spule einen grossen Widerstand ohne Selbstinduktion (geradlinige oder im Zickzack ausgespannte Drähte, bifilar gewundene Rollen) und legt diesen Stromkreis als Nebenschluss an die Klemmen des Wechselstromapparates, dessen Leistung ermittelt werden soll. Durch die feste Spule wird der Hauptstrom geleitet. (Vergl. Fig. 131.)



Fig. 131. Wattmeter von Bláthy.

Die Konstante des Instrumentes wird auf dieselbe Weise mit Gleichstrom bestimmt, wie bei dem Siemens'schen Wattmeter.

4. Das Präzisionswattmeter von Siemens & Halske.[1])

Eine neue Konstruktion von Wattmetern beruht auf dem so fruchtbaren Konstruktionsprinzip, das den Spulengalvanometern von Deprez-d'Arsonval zu Grunde liegt.

In einem ringförmigen Luftraum wird ein möglichst gleichförmiges Magnetfeld erzeugt, in dem die Kraftlinien radial verlaufen. In diesem Feld bewegt sich die Schwachstromspule des Wattmeters. Das magnetische Feld wird der Stromstärke proportional gemacht. Für Gleichstrom geschieht dies unter Anwendung eines Kunstgriffes, der den Einfluss der magnetischen Hysteresis vernichtet.

Um das Feld zu erzeugen, benutzt man einen kreisförmigen Leiter, in welchen der Strom von links eintritt, sich in zwei Teile spaltet und an dem der Eintrittsstelle diametral gegenüberliegenden Teile austritt (Fig. 132).

Die Kraftlinien verlaufen dann so, dass sie an der unteren Seite des Ringes eine radiale Anordnung zeigen. In diesen radial ver-

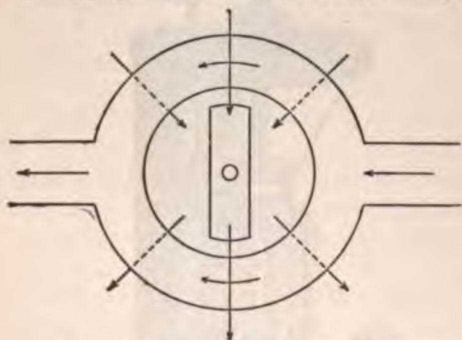


Fig. 132. Erzeugen des Magnetfeldes beim Präzisionswattmeter.



Fig. 133. Gestalt des Kupferstreifens des Starkstromkörpers.

laufenden Kraftlinien schwingt nun die Schwachstromspule, und die senkrechten Stromleiter derselben werden in ganz ähnlicher Weise von den Kraftlinien geschnitten, wie dies bei Magnetinstrumenten nach dem Prinzip von Deprez-d'Arsonval der Fall ist. (Vergl. Kap. VI, Abschn. 16, S. 154.)

Die Kupferstreifen, aus denen die Wattmeter-Starkstromkörper zusammengesetzt sind, sind mit passenden Einschnitten versehen, um ein Zustandekommen von Wirbelströmen im Kupferkörper selbst auf ein Mindestmass herabzudrücken. (Vergl. Fig. 133.)

---

[1]) Vergl. Raps, E T Z Bd. XX, 1899, S. 662.

Die bewegliche (Schwachstrom-) Spule wird frei auf einen Messingkörper gewickelt, der nach Beendigung der Wickelung aus der Spule herausgezogen wird, die dann aus weiter nichts besteht, als dem isolierten Kupferdrahte. In der Wickelung ist ferner oben und unten je eine Elfenbeinbuchse mit entsprechend geformtem Fusse festgelagert, die zur Befestigung der Spule an der Achse dient. Die Wickelung selbst besteht aus mehreren Lagen mit Seide besponnenem dünnen Kupferdraht und hat 100 Ω Widerstand. Der Selbstinduktionskoëffizient der beweglichen Spule beträgt nur 0,0088 Henry, ist also sehr klein.

Der Widerstand dieser Spule wird mit Hilfe einer Vorschaltung und eines Nebenschlusses (beide bifilar aus Manganindraht gewickelt) zwischen den Spannungsklemmen des Instrumentes auf 1000 Ω abgeglichen. Ohne besonderen Vorschaltwiderstand ist dann das Instrument für maximal 30 V bestimmt. Durch passende Wahl des Vor- und Nebenschlusses bei der Abjustierung auf 1000 Ω wird die Konstante des Instrumentes auf eine einfache, rechnerisch bequeme Zahl gebracht.

Für je 1000 Ω bifilar gewickelten Manganindrahtes, die man in den Spannungskreis des Wattmeters einschaltet, kann man dasselbe für Messungen mit einer um 30 V höheren Spannung brauchbar machen.

Für die rasche Einstellung der beweglichen Spule des Wattmeters ist die bei diesen Instrumenten angewendete Luftdämpfung (vergl. Fig. 134) von grosser Bedeutung. In einem kreisförmig gebogenen Rohre bewegt sich, ohne irgendwie anzustreifen, eine Dämpferscheibe p, die durch den Arm b mit der Achse s fest verbunden ist, deren Drehungen gedämpft werden sollen. Die Dämpferscheibe ist am Rande verbreitert, um der vorbeistreichenden Luft einen möglichst grossen Reibungswiderstand entgegen zu setzen.



Fig. 134. Luftdämpfung des Präzisionswattmeters.

Diese Luftdämpfung wirkt äusserst energisch und kann selbst Systeme mit grossen Trägheitsmomenten und starker Richtkraft nahezu aperiodisch einstellen.

Die Einrichtung und der Bau des Instrumentes kann aus Fig. 135 ersehen werden. Das Äussere des Apparates ist aus Fig. 136 ersichtlich.

Diese Wattmeter werden auch als Schaltbrettinstrumente mit horizontal liegender Achse und neuerdings auch als registrierende Wattmeter gebaut.

Zur Beseitigung der zumal bei Messung von Wechselströmen so störend auftretenden Wirbelströme wurden bei den vorliegenden Instrumenten die schon erwähnten Schlitze im Kupferkörper angebracht, ferner wurden die Kupferstreifen voneinander isoliert und

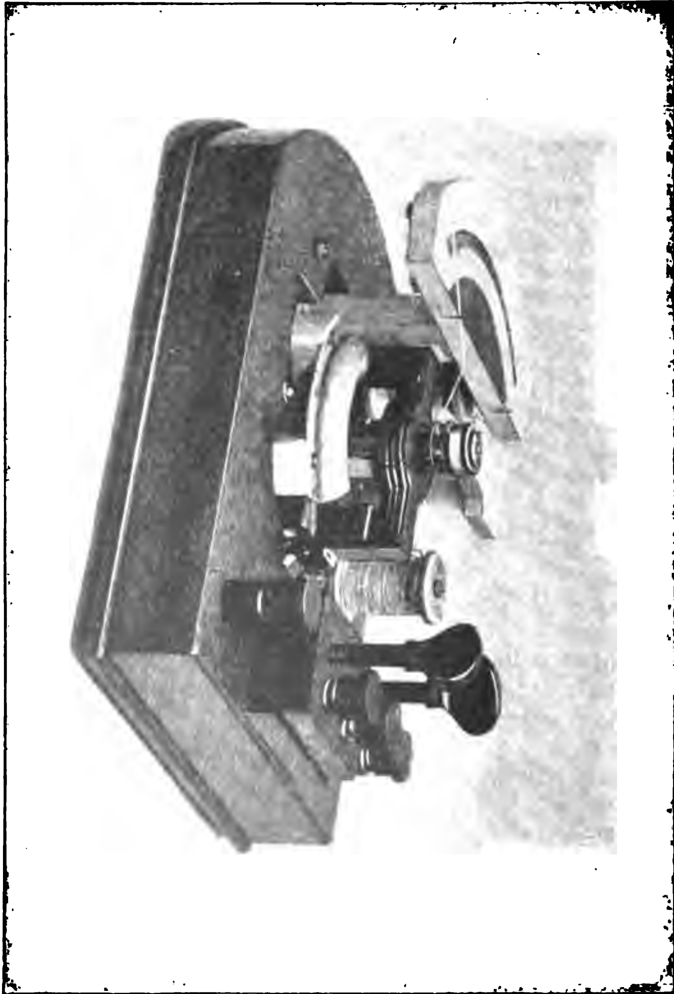


Fig. 135. Präzisionswattmeter von Siemens & Halske.

endlich wurden im Instrument sämtliche Metallteile, mit Ausnahme der unvermeidlichen, durch entsprechende Teile aus Vulkanitasbest oder Holz ersetzt. Durch diese Anordnungen wird der Einfluss der Wirbelströme auf die Angaben des Instrumentes so herabgedrückt,

dass dieselben für Gleich- und Wechselstrom als gleichmässig richtig angesehen werden können.

Bei Messung von Gleichstromenergie ist folgendes zu beachten: da das Präzisionswattmeter direkte Ablesung besitzt, so wird es für



Fig. 136. Präzisionswattmeter für zwei Messbereiche von Siemens & Halske.

seine bewegliche Spule nur eine einzige Zeigereinstellung geben, bei der die erdmagnetische Horizontalkomponente auf jene keine ablenkende Wirkung ausübt. Bei jeder anderen Zeigerlage wird jene Kraft einen merkbaren, wenn auch geringen Einfluss haben. Diesen Einfluss beseitigt man dadurch, dass man sowohl vor die feste als auch vor die bewegliche Spule einen Stromwender legt, bei beiden Stromwenderstellungen den Wattmeterausschlag beobachtet und aus beiden Beobachtungen das Mittel nimmt.

Über die Art und Weise, wie die Wickelungen des Präzisionswattmeters mit dem zu untersuchenden Nutzstromkreis verbunden werden, giebt Fig. 137 Auskunft. Die feststehende Wickelung wird

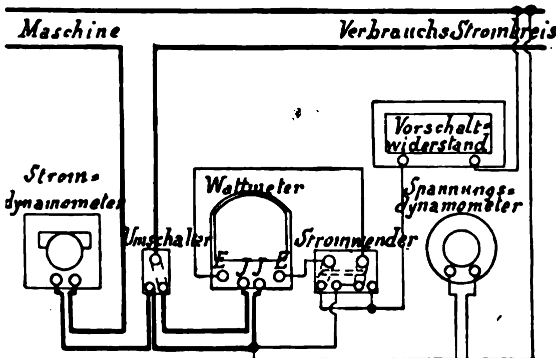


Fig. 137. Schaltung des Wattmeters.

in den Nutzstromkreis geschaltet, während man den beweglichen Spulenkreis eventl. in Hintereinanderschaltung mit dem induktionsfreien Vorschaltwiderstande parallel zum Nutzstromkreise bringt. Die

eine der Spannungsklemmen verbindet man mit der einen Starkstromklemme, während die andere Spannungsklemme am Vorschaltwiderstand liegt, dessen zweite Klemme an den anderen Pol des Nutzstromkreises geschlossen ist. Soll abwechselnd Energieaufnahme und Energieabgabe gemessen werden, so empfiehlt es sich, einen zweipoligen Umschalter vor die bewegliche Spule zu legen, wie es aus Fig. 137 ersichtlich ist.

Bei Arbeiten in Wechselstromkreisen wird man ausserdem in die Leitung noch ein Strom- und Spannungselektrodynamometer einfügen (siehe Fig. 137). Man ist dann in den Stand gesetzt, sich über die Grösse der etwa vorhandenen Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im Nutzstromkreise zu unterrichten.

Bei richtiger Schaltung der beiden Spulen wird der Zeiger in die Skala hinein ausschlagen. Bewegt er sich aus der Skala heraus, so muss die Stromrichtung entweder in der festen oder in der beweglichen Spule geändert werden, was gegebenen Falls leicht mit Hilfe des in den beweglichen Spulenkreis gelegten Stromwenders bewirkt werden kann.

Hat man bei Arbeiten mit Gleichstrom unter Zuhilfenahme der Stromwender den mittleren Ausschlag $= \alpha$ Skalenteile gefunden, so ergiebt dieser multipliziert mit einer mittleren von der Bauart und der Justierung des Instrumentes abhängigen Konstante, sowie mit dem Gesamtwiderstand des Spannungskreises die gesuchte Leistung in Watt. Denn der Zeigerausschlag α mal der vorerwähnten Konstante ist proportional dem Produkte der in dem festen und dem beweglichen Spulenkreise fliessenden Ströme; also:

$$J \cdot i = C \alpha \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

Bezeichnen wir mit w den Widerstand zwischen den Spannungsklemmen des Wattmeters, mit W den mit ihnen verbundenen, induktionsfreien Widerstand und mit E die an den Enden beider herrschende Spannung, so ist

$$i = \frac{E}{W + w} \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

Dies in Gleichung 3) eingeführt, giebt

$$J \cdot E = C \cdot (W + w) \cdot \alpha \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

und da $J \cdot E = A$ die Leistung des Nutzstromkreises ist, wenn derselbe von Gleichstrom gespeist wird, so haben wir für die gesuchte Leistung bei Gleichstrom

$$A = C \cdot (W + w) \cdot \alpha \quad \ldots \ldots \quad 6)$$

5. Messungen mit dem Kalorimeter.

Wenn an Wechselstromapparaten mit erheblicher Selbstinduktion oder Kapazität Messungen vorgenommen werden sollen, erhält man

gelegentlich auch mit dem Wattmeter keine völlig zuverlässigen Angaben. Alsdann kann man sich dadurch helfen, dass man die zu messende elektrische Arbeit in Wärme umsetzt, und die während einer bestimmten Zeit entwickelte Wärmemenge mit einem Kalorimeter misst.

6. Allgemeines über Elektrizitätszähler.

In vielen Fällen der Praxis kommt es darauf an, die Menge elektrischer Energie kennen zu lernen, die innerhalb eines bestimmten Zeitraumes von einer Lampe, einer elektrischen Heizvorrichtung, einem Motor oder einem elektrochemischen Apparate verbraucht worden ist. — Bei elektrischen Centralanlagen soll z. B. von denjenigen, welche die Elektrizität verbrauchen, nach Massgabe dieses Verbrauches Zahlung geleistet werden. Man bedarf zu diesem Zwecke Vorrichtungen, die selbstthätig die innerhalb gewisser Zeitabschnitte verbrauchten elektrischen Arbeitsgrössen addieren und in irgend einer Form aufzeichnen; solche Apparate nennt man Elektrizitätszähler oder Elektrizitätsmesser.

Aus der grossen Zahl derartiger Instrumente führen wir nur wenige an, und zwar diejenigen, die zur Zeit am meisten für Gleichstrommessungen eingeführt sind, oder voraussichtlich wenigstens ihrem Prinzip nach längere Zeit hindurch Bedeutung behalten werden.

Laboratoriumsapparate für solche Zwecke zu konstruieren, ist nicht schwer; sowie man aber dazu übergeht, Einrichtungen herzustellen, die für den Gebrauch in elektrischen Anlagen bestimmt sind, stellen sich vielfach ganz unerwartete Schwierigkeiten heraus. Besonders ist es nicht leicht solche Instrumente anzufertigen, die auch bei ganz geringem Elektrizitätsverbrauch (wenn in einer Anlage etwa nur eine oder ganz wenige Lampen brennen) in Thätigkeit treten, und dann auch bei voller Inanspruchnahme noch richtige Angaben machen. Meist sucht man dies dadurch zu erreichen, dass man neben den zur Messung dienenden Spulen noch einen Nebenschluss von sehr hohem Widerstande hinzunimmt, der stets von einem schwachen Strome durchflossen wird und dessen Wirkung gerade ausreicht, die Reibungswiderstände des Apparates zu überwinden.

Diese lediglich zum Betriebe des Elektrizitätszählers verbrauchte Energie aber muss sehr klein sein, wenn sie nicht, da der Zähler dauernd in der Verbrauchsleitung bleibt, zu erheblichen Verlusten Anlass geben soll.

Apparate dieser Art müssen sich ferner leicht nachprüfen (aichen) lassen, und müssen so eingerichtet sein, dass sie Transport vertragen, und auch von ungeübten Händen angebracht und in Thätigkeit gesetzt werden können.

Endlich müssen brauchbare Zähler verhältnismässig billig sein, damit auch derjenige, der nur wenig elektrische Energie verbraucht, sich derselben bedienen kann.

Weitaus am häufigsten ist der Fall, dass die Verteilung elektrischer Energie bei unveränderlicher Spannung stattfindet; alsdann braucht nur die Strommenge gemessen zu werden. Der Messapparat wird von dem Hauptstrome durchflossen und muss Ampèrestunden aufzeichnen. In seltenen Fällen (z. B. bei hintereinandergeschalteten Lampen oder Elektromotoren) wird dagegen die Stromstärke unveränderlich erhalten; dann muss das Messinstrument in einem Nebenschlusse von sehr hohem Widerstande liegen und muss Voltstunden zählen.

Die auf den chemischen Wirkungen des Stromes beruhenden Elektrizitätszähler, die beispielsweise Edison noch bis vor kurzer Zeit in seinen elektrischen Centralen anwendete, sind neuerdings ganz verlassen worden, da sie den Gebrauch einer Wage voraussetzen und nicht leicht fortlaufend von demjenigen selbst nachgesehen werden können, der die elektrische Energie verbraucht hat und bezahlen soll.

Die meisten neueren Einrichtungen, die zur Messung der Elektrizitätsmenge oder der verbrauchten elektrischen Arbeit dienen, beruhen auf den Wechselwirkungen von Strömen und magnetischen Feldern. Durch diese Wirkungen wird ein bewegliches System in Umdrehungen versetzt, dessen Geschwindigkeit wenigstens innerhalb des Messbereiches des Instrumentes der Stärke des durch den Apparat fliessenden Stromes oder der verbrauchten Energie proportional ist. Die Zahl der Umdrehungen wird durch ein einfaches Zählwerk aufgezeichnet. Solche Apparate nennt man Motorzähler.

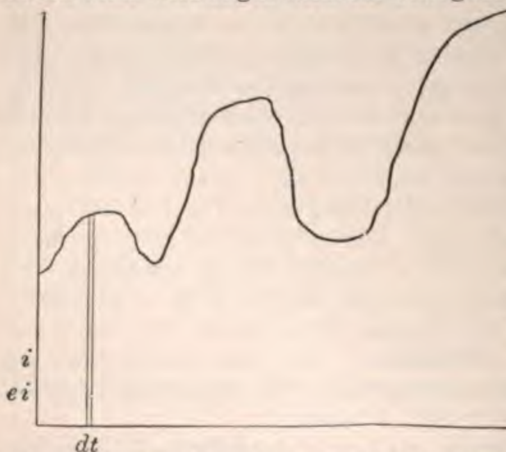


Fig. 138. Summation durch absatzweise wirkende Zähler.

Durch Multiplikation der Zahl der Umdrehungen mit einem durch Versuche zu ermittelnden Faktor erhält man dann ohne weiteres die Elektrizitätsmenge oder Energie, die durch den Zähler geflossen ist.

Ausserdem giebt es noch Zähler, die absatzweise die verbrauchte Energie messen und zählen.

Stellt z. B. in nebenstehender Fig. 138 die krumme Linie die zu verschiedenen Zeiten verbrauchte elektrische Energie e · i dar,

während die Zeit die Abscisse ist, so ist es die Aufgabe des Zählers, den Flächeninhalt zu messen, der zwischen der krummen Linie und der Abscissenachse liegt. Der absatzweise messende Zähler zerlegt nun dies Flächenstück in kleine Streifen mit gleichen, kleinen Abscissen dt, und misst und addiert die als kleine Rechtecke betrachteten Flächen. Nach diesen Grundgedanken haben schon früher Sir W. Thomson und Werner von Siemens und neuerdings Siemens & Halske brauchbare Messapparate konstruiert.

Eine dritte Gruppe bilden die Uhrenzähler.

A. Motorzähler.

7. Der Ferranti'sche Elektrizitätszähler (1883).

Dieser Apparat (vergl. Fig. 139) beruht auf der elektrodynamischen Bewegung von Flüssigkeiten, von der wir früher (Kap. VII, Abschn. 4, S. 163) gesprochen haben. Ein aus Eisen hergestelltes Gefäss M von rechteckiger Gestalt enthält chemisch reines Quecksilber; in diesem befindet sich ein kleines drehbares Flügelrädchen F, von der Gestalt eines Z, dessen Achse ein Zählwerk in Bewegung setzt. Von einer Klemme A gelangt der zu messende Strom in eine aus einem Streifen Kupferblech hergestellte Spule D, die den mittleren Teil des Eisenstückes umgiebt. Aus diesen Windungen gelangt der Strom unmittelbar in das Quecksilber, fliesst in radialer Richtung durch dasselbe hindurch, tritt in der Mitte des Queck-

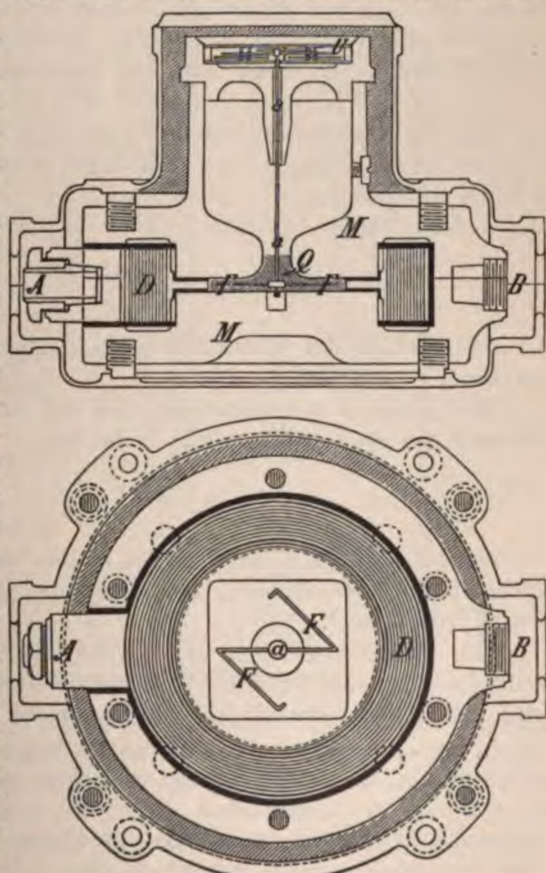


Fig. 139. Elektrizitätszähler von Ferranti.

silbers durch eine blanke Stelle a von geringer Ausdehnung in das Metall des Eisenkörpers über und wird durch die Klemme B wieder abgeführt.

Nun ist der Reibungswiderstand L, der sich der drehenden Bewegung des Quecksilbers entgegenstellt, dem Quadrate der Geschwindigkeit der Bewegung proportional. Somit ist:

$$L = C \cdot n^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 7)$$

wenn n die Anzahl der Umdrehungen des Quecksilbers in der Zeiteinheit und C eine Konstante ist. Anderseits ist die bewegende Kraft der die Drehung veranlassenden elektrodynamischen Wirkung gleichzeitig der Stromstärke und der Stärke des magnetischen Feldes des Elektromagneten proportional. Da aber in genügender Entfernung vom magnetischen Sättigungszustande des Eisens die Feldstärke der Zahl der Ampèrewindungen proportional gesetzt werden kann, und die Windungszahl konstant bleibt, ist somit die bewegende Kraft K dem Quadrate der Stromstärke proportional oder

$$K = C' \cdot i^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

Da nun ein stationärer Bewegungszustand eintritt, wenn die bewegende Kraft K gleich dem Reibungswiderstande L wird, ergiebt sich die Gleichung: $C \cdot n^2 = C' \cdot i^2$
und daraus folgt, wenn man beiderseitig die Wurzel auszieht:

$$n = \sqrt{\frac{C'}{C}} \cdot i \quad \ldots \ldots \ldots \quad 9)$$

die Umlaufszahl des Quecksilbers ist somit der Stromstärke proportional.

Multiplizieren wir beiderseitig mit der Anzahl der Zeiteinheiten, während der der Strom wirkt, so hat man:

$$n \cdot t = \sqrt{\frac{C'}{C}} \cdot i \cdot t \quad \ldots \ldots \ldots \quad 10)$$

Die Gesamtzahl der Umdrehungen n t ist somit der Zahl i t, der Anzahl der Ampèrestunden, die durch den Apparat geflossen sind, direkt proportional.

Der Faktor, mit dem die abgelesene Zahl der Umdrehungen multipliziert werden muss, um unmittelbar Stundenampère zu erhalten, wird vom Fabrikanten durch eine besondere Aichung ermittelt.

Wenn man zur Erzeugung des Feldes, in dem sich das Quecksilber bewegt, massive Eisenteile vermeidet und nur die in der Luft, beziehentlich im Quecksilber erzeugten Kraftlinien einer vom zu messenden Strome durchflossenen Spule benutzt, so kann der Apparat auch für Wechselströme benutzt werden.

Leider sind die Grenzen, innerhalb welcher strenge Proportionalität zwischen der Umdrehungszahl und der Elektrizitätsmenge besteht, ziemlich eng; sonst würde der Ferranti'sche Elektrizitätszähler, seiner grossen Einfachheit wegen, gewiss allgemeinere Verbreitung gefunden haben.

8. Der Volt-Stundenzähler von O'Keenan.

Dieser Apparat beruht auf der Proportionalität zwischen der EMK einer magnetelektrischen Maschine und der Winkelgeschwindigkeit ihres Ankers, und ferner auf der Thatsache, dass der Wirkungsgrad eines Motors ein Maximum (100%) wird, wenn die Belastung derselben Null wird. Die Winkelgeschwindigkeit des Ankers ist dann dem Potentialgefälle an den Klemmen streng proportional.

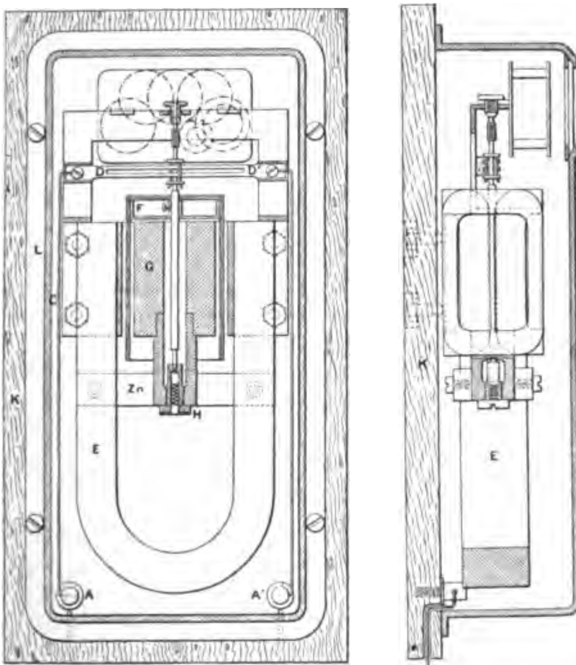


Fig. 140. Voltstundenzähler von O'Keenan.

Um einen Motor zu konstruieren, dessen Belastung thunlichst gleich Null ist, müssen alle inneren und äusseren Verluste (Hysteresis, Foucaultströme, Reibungswiderstände) auf ein Minimum gebracht werden.

O'Keenan hat dies durch folgende Anordnung zu erreichen gesucht (vergl. Fig. 140).

E ist ein kräftiger Dauermagnet in Hufeisenform. Zwischen seinen Polen befindet sich ein kleiner, glockenförmiger Anker F. Die Spulen dieses Trommelankers haben die in Fig. 141 dargestellte halbcylindrische Form und sind unter sich und mit den Lamellen eines kleinen Kollektors, ähnlich wie bei dem Trommelanker einer Gleichstrommaschine, verbunden. Im Innern dieses Ankers befindet sich ein weicher Eisenkern, um den sich der Anker frei bewegt. Der Zweck dieses Ankers ist derselbe, wie bei dem Deprez-d'Arsonval-Galvanometer, er soll den magnetischen Widerstand der Kraftlinien verringern und ein homogenes Feld mit radialem Verlauf der Kraftlinien erzeugen. Da dieser Eisenkern ruht, entstehen in ihm keine Hysteresisverluste. Er wird von unten durch eine Säule getragen.

Die Ankerachse ruht unten auf einer Rubinpfanne, oben trägt sie eine Schraube ohne Ende, durch die sie ihre Bewegung auf ein Zählwerk überträgt.

Die kleinen Bürsten D und D′, die auf dem Kollektor des Ankers aufruhen, stehen unmittelbar mit den Apparatklemmen A A′ in Verbindung.


Fig. 141. Spule des Glockenankers.

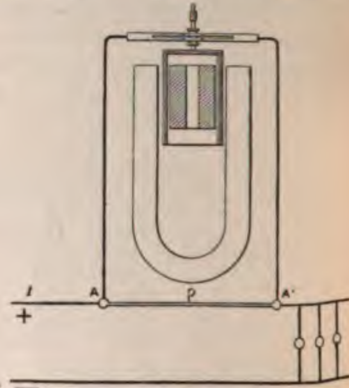


Fig. 142. Schaltung des Voltstundenzählers als Amperestundenzähler.

Die Winkelgeschwindigkeit, mit der sich der Anker dreht, wächst solange, bis die vom Anker entwickelte E M K der zu messenden fast völlig gleich geworden ist.

Für Verteilungssysteme mit unveränderlicher Stromstärke (System Bernstein) kann dieser Voltstundenzähler ohne weiteres in einen Nebenschluss zu den Verbrauchsleitungen gelegt werden.

Soll das Instrument jedoch bei den allgemein üblichen Energieverteilungssystemen mit unveränderlicher Spannung verwendet werden, so muss es die verbrauchte Strommenge registrieren.

Man legt zu diesem Zwecke zwischen die beiden Klemmen A und A′ des Apparates einen kleinen Nebenschlusswiderstand ϱ von passender Grösse und lässt den zu messenden Arbeitsstrom durch diesen Widerstand hindurch gehen (vergl. Fig. 142). Der Spannungsunterschied an den Enden des Nebenschlusses ϱ ist der Stromstärke bekanntlich streng proportional. Da das Instrument nun Voltstunden summiert, registriert es gleichzeitig die Ampèrestunden, die durch den Nebenschluss geflossen sind.

Der Apparat ist unter dem Namen O'K-Zähler in England ziemlich verbreitet, da er einfach und von der Temperatur unabhängig ist. Da der Anker sich immer so rasch dreht, dass seine elektromotorische Gegenkraft der zu messenden Spannung fast völlig gleich wird, fliesst ein Strom von fast verschwindender Stärke durch den Anker. Es tritt daher auch keine Funkenbildung an den Bürsten auf. Die Proportionalität zwischen Spannung und Rotationsgeschwindigkeit ist fast vollkommen.

9. Der Elektrizitätszähler von Elihu Thomson (1890).

Dieser Elektrizitätszähler gehört auch zu den Motorzählern, und zwar ist er sowohl für Gleichstrom als für Wechselstrom verwendbar. Der zu messende Strom durchfliesst die Windungen zweier Spulen J und J' (vergl. Fig. 143) und erzeugt auf diese Weise ein magnetisches Feld. In diesem Felde befindet sich der achtteilige Trommelanker M einer kleinen Dynamomaschine, dessen Wickelung einem

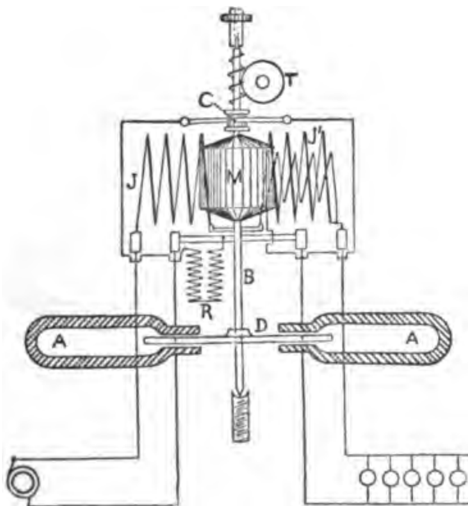


Fig. 143. Einrichtung des Thomsonzählers.

Nebenschluss von hohem Widerstande und geringer Selbstinduktion angehört. Die Ankerwicklung wird also von einem sehr schwachen, der konstanten Spannung proportionalen Strom durchflossen. Eisenteile kommen in diesem Anker nicht vor. Der Kommutator C und die Bürsten dieser kleinen Dynamomaschine bestehen aus Silber. (Vergl. Fig. 143.) Die Anzugskraft einer kleinen Hilfsspule (rechts in J'), die dauernd von einem sehr schwachen Strome durchflossen wird, kompensiert gerade die Reibungswiderstände.

Der Anker setzt sich in Bewegung, wenn Strom verbraucht wird, und die von ihm geleistete Arbeit ist sowohl der Energie des zu messenden Stromes als auch der Geschwindigkeit proportional. An der Achse dieses rotierenden Ankers befindet sich oben eine Schraube ohne Ende, die ein Zählwerk T in Bewegung setzt; am unteren Ende trägt diese Achse A eine horizontale Kupferscheibe D, die sich zwischen den Schenkeln von drei Hufeisenmagneten AA bewegt. Die in der drehenden Kupferscheibe durch diese Magnete erzeugten Induktionsströme wirken bremsend auf die rotierende Bewegung, und zwar ist die entstehende Widerstandskraft dem Quadrate der

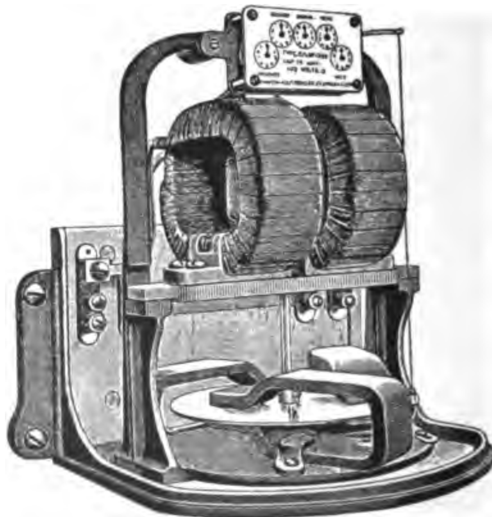


Fig. 144. Thomson'scher Elektrizitätszähler der Union Elektrizitätsgesellschaft in Berlin.

Geschwindigkeit der Scheibe proportional. Wenn Bewegungsgleichgewicht eintritt, ist die gesamte von der kleinen Dynamomaschine erzeugte Arbeit der hemmenden Wirkung der Kupferscheibe gleich und somit ist die Geschwindigkeit der Drehbewegung der Energie des Stromes, der durch den Apparat gemessen werden soll, selbst proportional.

Durch äusserst sorgfältige mechanische Arbeit sind die Reibungswiderstände auf einen sehr geringen Betrag herabgebracht. Da die Achse höchstens 60 Umdrehungen in der Minute macht, wird der Luftwiderstand durch die Dichte der Luft nicht merklich beeinflusst.

Auch dieser Zähler hat sich in der Praxis gut bewährt und kann für die verschiedensten Spannungen und Stromstärken passend hergestellt werden. Die äussere Erscheinung des Zählers zeigt Fig. 144.

Die Verbindung mit den Leitungen sind für Zweileiter aus Fig. 145 und für Dreileiteranlagen aus Fig. 146 zu ersehen.

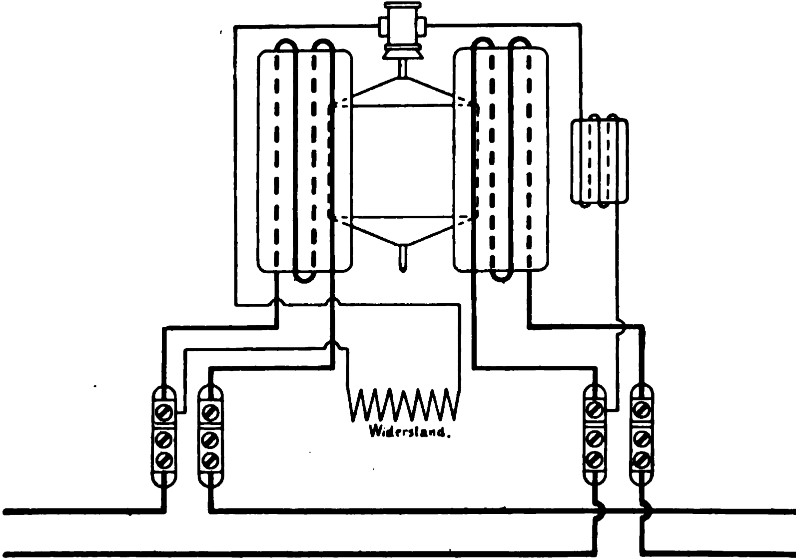


Fig. 145. Einschaltung des Thomsonzählers in ein Zweileitersystem.

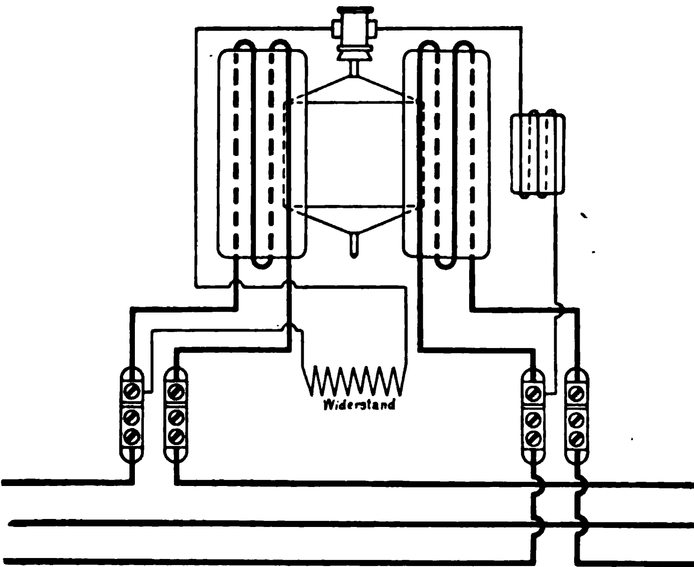


Fig. 146. Einschaltung des Thomsonzählers in ein Dreileitersystem.

In beiden Fällen werden die von der Stromquelle kommenden Leiter an die erste und dritte Klemme angelegt, die Arbeitsleitung, im Dreileitersystem die Aussenleiter derselben, werden an die zweite und vierte Klemme gelegt. Der Mittelleiter wird nicht mit dem Zähler verbunden.

Nach demselben Grundsatze hatte übrigens Werner von Siemens schon im Jahre 1887 einen Elektrizitätszähler für Gleichstrom gebaut. Bei diesem Instrumente aber wurde das magnetische Kraftlinienfeld durch einen permanenten Magneten erzeugt, der gleichzeitig auch die bremsende Wirkung durch Foucaultströme in einem mit dem Anker der Dynamomaschine rotierenden Kupfercylinder hervorrief. Änderungen der Stärke dieses permanenten Magneten beeinflussten somit in gleichem Sinne die von dem Elektromotor erzeugte Arbeit und den diese Arbeit aufbrauchenden Widerstand, sie blieben daher in ziemlich weiten Grenzen ohne Einfluss auf die Angaben des Zählers.

Auch Hummel hat einen dem Thomson'schen im Prinzipe nahe verwandten Zähler hergestellt. Die bremsende Wirkung auf die mit dem Anker einer kleinen Dynamomaschine rotierende Kupferscheibe wird aber bei diesem Apparate von einem Elektromagneten bewirkt, den derselbe Strom erregt, der durch die Wickelung des Ankers fliesst. Änderungen der Spannung des zu messenden Stromes haben auf die Geschwindigkeit der Drehbewegung innerhalb mässiger Grenzen keinen Einfluss, da die Arbeitsleistung des Ankers und der Widerstand, der diese Arbeit verbraucht, in gleichem Sinne zu- und abnehmen.

10. Die Elektrizitätszähler der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vormals Schuckert & Co.

Diese Instrumente gehören, wie der Thomsonzähler, zu den reinen Motorzählern. Der Apparat besteht aus drei Hauptbestandteilen, dem Motor, der Dämpfung und dem Zählwerk. Der Motor enthält weder im Anker A, noch im Feldmagnet F Eisen, daher fallen die Angaben bei steigender und bei sinkender Stromstärke zusammen. Der Anker A hat kugelförmige Gestalt und rotiert um eine Achse, die oben das Zählwerk bewegt und unten eine Scheibe S trägt, die zwischen feststehenden Magneten sich bewegt. Die Stromzuführung zum Anker erfolgt am Kollektor K durch kleine Schleiffedern ff. (Vergl. Fig. 147 und Fig. 148.)

Die beiden Hauptstromspulen FF werden von dem zu registrierenden Strom durchflossen, während der mit einer Trommelwickelung versehene Anker A unter Vorschaltung eines sehr grossen Widerstandes von der Spannung beeinflusst wird; es ist also die Zugkraft des

Motors dem Produkt aus Strom mal Spannung, der Anzahl der Watt, proportional. Daher kann ein GW-Zähler sowohl für Gleichstrom, wie für Wechselstrom mit beliebiger Polwechselzahl benutzt werden. Die Zähler Mod. GB haben infolge der Anordnung der Metallmassen grössere Selbstinduktion und sind nur für Gleichstrom geeignet.

Die von dem Motor entwickelte mechanische Arbeit wird durch eine auf der Motorachse sitzende und zwischen den Polen zweier kräftiger Dämpfungsmagnete MM rotierende Metallscheibe S aufgenommen. Durch diese Dämpfung wird die Geschwindigkeit des oben beschriebenen Motors in der Weise beeinflusst, dass die Umdrehungszahl im ganzen Messbereich des Zählers der verbrauchten Energie proportional ist. Die Summe der Umdrehungen des Motors innerhalb einer gewissen Zeit giebt ein Mass für die während dieser Zeit verbrauchte elektrische Energie.

Die Umdrehungszahl wird durch den dritten Teil, das Zählwerk, summiert. Dieses wird von der Motorachse durch ein Schneckenrad angetrieben und hat fünf Zeiger und Zifferblätter. An dem Zifferblatt wird der Verbrauch in Kilowattstunden direkt abgelesen, es ist also keine Multiplikation mit einer Zählerkonstante nötig.

Um die Reibung der Motorachse, die an sich sehr gering ist, da dieselbe auf einem fein polierten Edelstein läuft, völlig aufzuheben, ist in der rechten Hauptspule (Fig. 148) eine kleine Hilfsspule angeordnet, die, in den Ankerkreis eingeschaltet, stets von einem schwachen Strom durchflossen ist. Diese Spule ist verstellbar und wird so eingestellt, dass ihre dauernd auf den Anker ausgeübte Zugkraft genau die Reibung ausgleicht und der Zähler daher bei dem geringsten Verbrauchsstrome anläuft.

Die Messung beginnt schon bei 0,5 bis 2% der normalen Belastung. Die Messung unterliegt auch mit der Zeit keinen Änderungen, da keine veränderlichen Kräfte, wie Federn, Uhrwerk u. s. w. mitwirken. Der Zähler folgt ferner allen Schwankungen des Stromverbrauches, auch wenn dieselben plötzlich und in weiten Grenzen stattfinden.

Die Wartung beschränkt sich auf die Instandhaltung des Apparates; Nebenarbeiten, wie Aufziehen, Regulieren von Uhrwerken sind ausgeschlossen.

Elektrizitätszähler können ihren Zweck, den Verbrauch an elektrischer Energie zu registrieren, nur dann in gehöriger Weise erfüllen, wenn

1. die Messung bei allen Stärken des Verbrauches genau ist, d. h. die praktisch zulässigen Fehlergrenzen (2%) nicht überschreitet;

2. diese Genauigkeit nicht bloss an der Aichungsstelle vorhanden ist, sondern auch an jedem beliebigen Aufstellungsorte dauernd erhalten bleibt;
3. die Messung nicht von sorgfältiger Überwachung oder Bedienung abhängt.

Vorstehende Bedingungen werden durch diese Motorzähler befriedigend erfüllt.

Den für höhere Spannungen bestimmten Zählern wird ein besonderer Nebenschlusswiderstand beigegeben, derselbe beträgt z. B. bei einem für 550 Volt und 225 Ampère bestimmten Apparat 8546 Ohm.

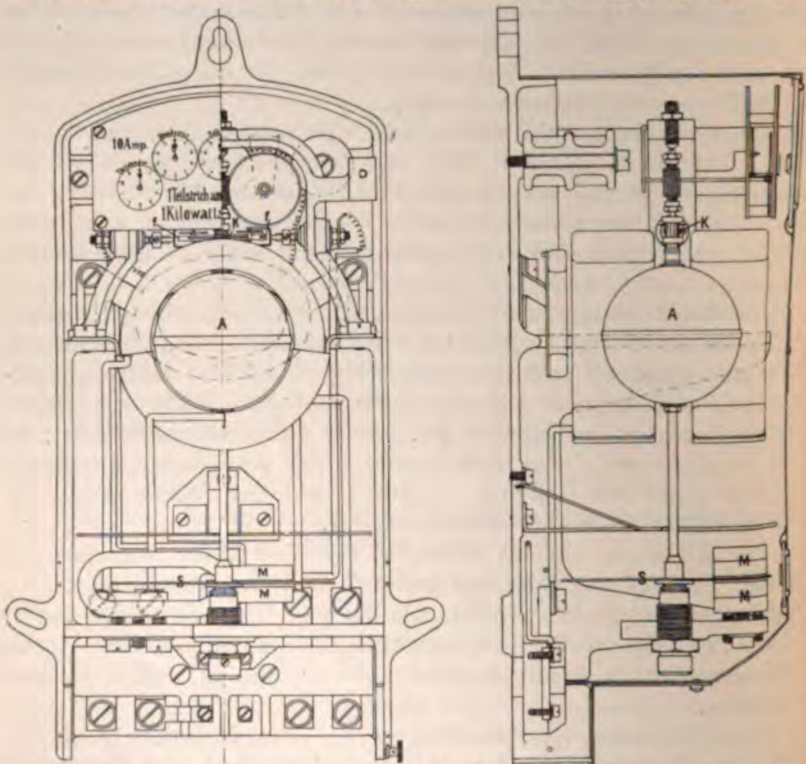


Fig. 147. Gleichstrom-Wattstundenzähler der Elektr.-Akt.-Ges. vorm. Schuckert & Co.

Die grössten Abweichungen sind von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt auf 1,2 bis 1,8 %, die mittlere Abweichung auf etwa 0,5 bis 1 % festgestellt worden. Die Instrumente werden deshalb zur amtlichen Aichung zugelassen.

Die obenstehenden Abbildungen Fig. 147 zeigen den nur für Gleichstrommessungen bestimmten Zähler Modell GB in Aufriss

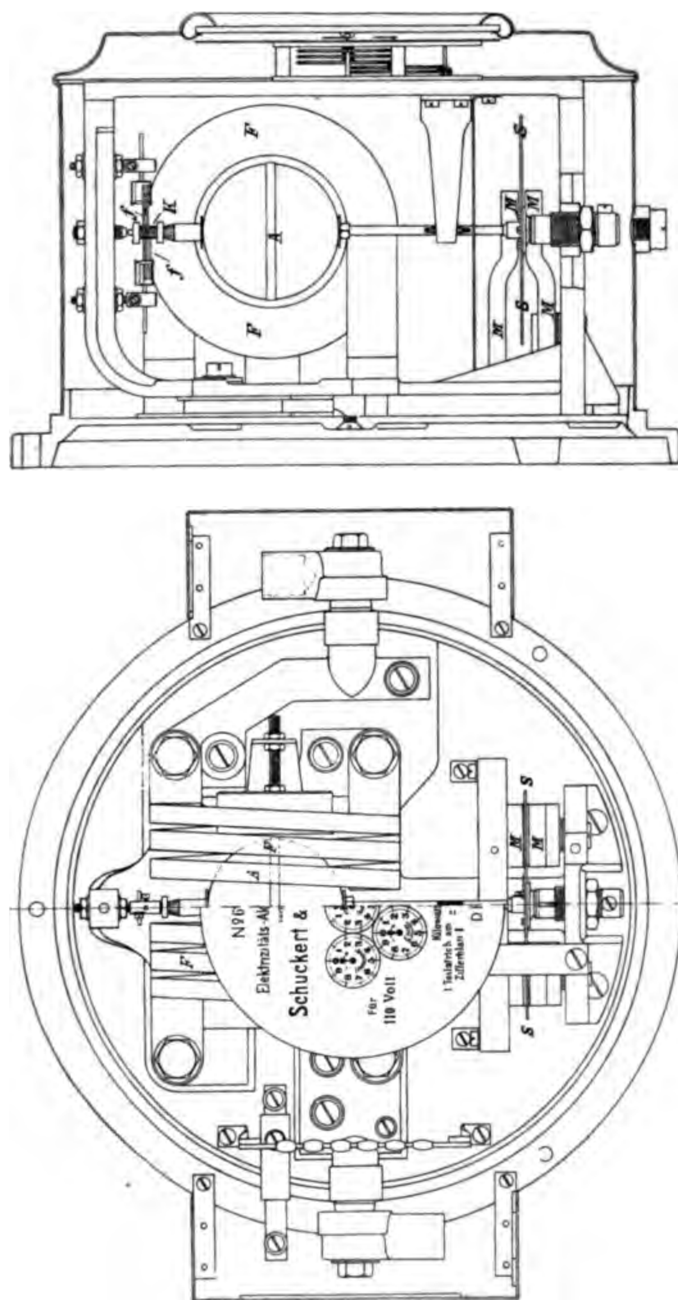


Fig. 148. Wattstundenzähler für Gleichstrom und Wechselstrom der Elektr.-Akt.-Ges. vorm. Schuckert & Co.

und Querschnitt. Die umstehenden Abbildungen Fig. 148 geben dieselben Darstellungen von dem für Messung von Gleich- und Wechselstrom bestimmten Modell GW.

B. Absatzweise wirkende Zähler.

11. Der Ampère-(Coulomb-)Stundenzähler von Siemens & Halske.

Bei diesem Apparate wird nicht fortlaufend, sondern absatzweise, in bestimmten kleinen Zeitabschnitten (alle $1^1/_4$ Minuten) eine der herrschenden Stromstärke proportionale Bewegung vollzogen, und diese Bewegungen werden durch ein Zählwerk ihrer Grösse nach summiert und registriert.

Das Instrument besteht aus drei Teilen: einem Strommesser, einem Uhrwerk, welches die Bewegung veranlasst, und einem Zählwerk, das die Bewegungen summiert.

Der Strommesser besteht aus einem kleinen Stück weichen Eisens e von elliptischem Querschnitt (vergl. Fig. 149), das um eine Achse beweglich ist. Mit dieser Achse dreht sich ein langer Zeiger z, an dessen oberem Ende sich als Gegengewicht ein zur Dämpfung dienender Flügel f aus Aluminiumblech befindet. Ziemlich dicht um diesen Eisenkern sind die Windungen w einer von dem zu messenden Strome durchflossenen Spule gelegt. Diese Windungen werden von einem Hufeisenmagneten m umfasst, durch den das aus Eisenkern e, Zeiger z und Flügel f bestehende, genau im Schwerpunkt unterstützte, drehbare System gerichtet wird. Fliesst durch die Windungen w ein Strom, so wird dieses System abgelenkt, und der Zeiger z zeigt durch seine Stellung auf einer Skala (vergl. Fig. 150) die Stromstärke an.

Fig. 149. Strommesser des älteren Elektrizitätszählers von Siemens & Halske.

Alle $1^1/_4$ Minuten drückt das Uhrwerk auf kurze Zeit einen gekrümmten Hebel S gegen den an seinem Ende zu einer Schneide ausgebildeten Zeiger z. Die Krümmung der fein gerippten Innenseite dieses Hebels ist so gewählt, dass der Winkel, um den sich der Hebel bei seinem Hube dreht, genau proportional der Stromstärke ist. Mit diesem Hebel ist ein Sperrkegel verbunden, der beim Hube ein Zahnrad des Zählwerkes gerade um so viele Zähne vorwärts schiebt, als dem

ungswinkel entspricht. Bei der Rückkehr des Hebels S in seine lage gleitet dieser Sperrkegel lose über die Zähne hin, ohne Zahnrad zu drehen.

Das Uhrwerk hat einen 40tägigen Gang und soll alle Monate al aufgezogen werden. Der ganze Apparat (vergl. Fig. 151)

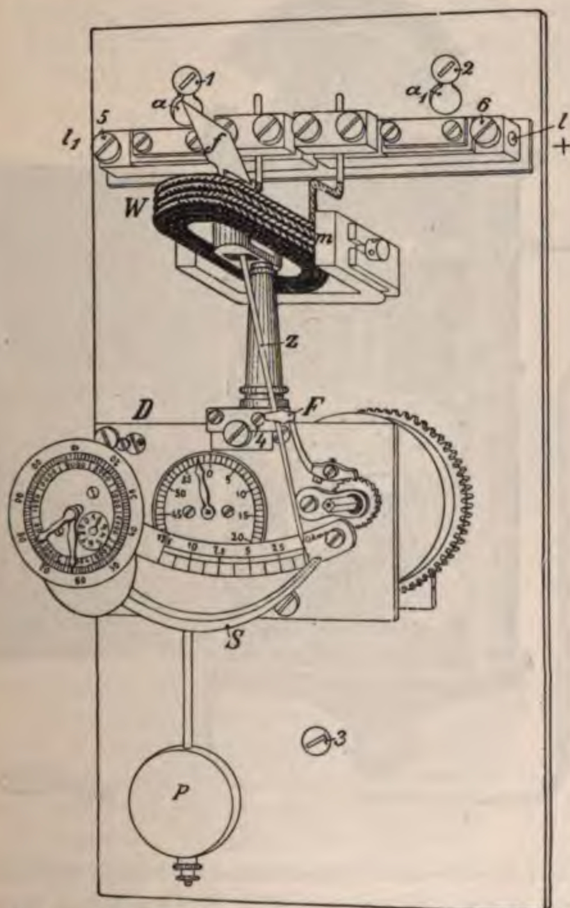


Fig. 150. Absatzweise messende Elektrizitätszähler von Siemens & Halske.

t in einem Kasten aus weichem Eisenblech, der durch seine netische Schirmwirkung einen Schutz gegen den Einfluss benach- r Starkstromleitungen oder kräftiger Magnete bildet. Durch n der Thür des Schutzkastens angebrachtes Fenster kann sowohl erade herrschende Stromstärke, als der Stromverbrauch bequem

abgelesen werden. Der Apparat dient somit gleichzeitig als Ampè meter und als Elektrizitätszähler.

Der grosse Vorzug dieses Instrumentes im Vergleich zu ander liegt darin, dass er auch ganz geringfügigen Stromverbrauch eben zuverlässig misst, als den Verbrauch stärkerer Ströme. Die meist

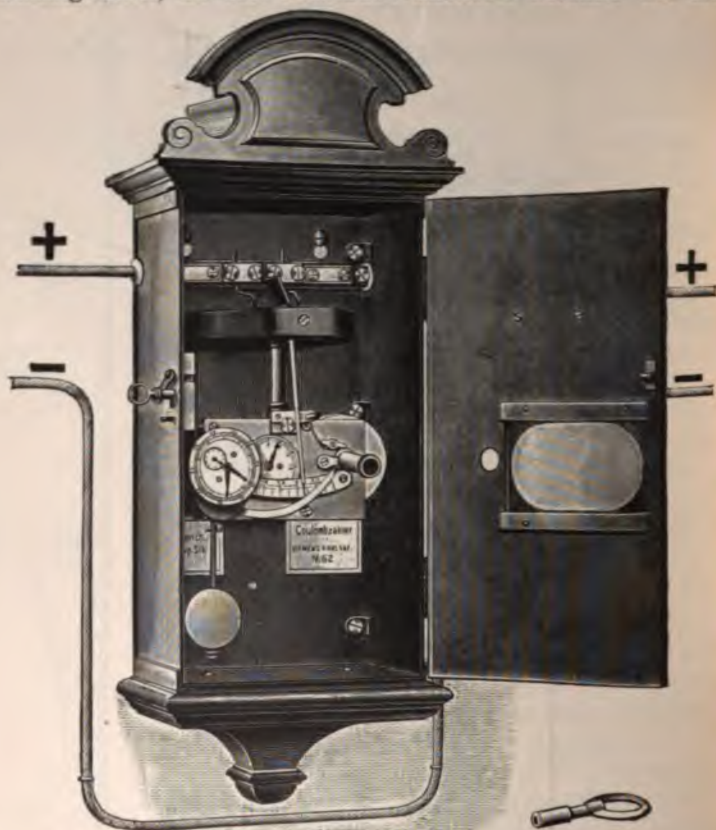


Fig. 151. Aeussere Erscheinung des älteren Elektrizitätszählers von Siemens & Halske.

Apparate, bei welchen durch den zu messenden Strom selbst bewegt Teile die Zählung bewerkstelligen, treten bei ganz geringem Ver brauche (wenn etwa nur eine Glühlampe in einer grösseren Anlag brennt) gar nicht oder nur verzögert in Thätigkeit, weil die Reibun der Ruhe grösser ist, als die der Bewegung.

Der Spannungsverlust, den die Einschaltung eines solchen Zähler in einem elektrischen Verteilungssysteme hervorruft, ist von ve schwindendem Betrage.

12. Die Präzisions-Elektrizitätszähler von Siemens & Halske.

Diese neuen Messinstrumente gehören zwar auch wie der in Abschn. 11 beschriebene Ampère-(Coulomb-)Zähler zu den absatzweise messenden Zählern. Sie unterscheiden sich aber dadurch von jenen, dass an Stelle der Federuhr ein auf elektromagnetischem Wege bethätigtes Triebwerk, eine Art von periodischem Elektromotor, benutzt wird, und dass als Strom- beziehentlich Wattmesser ein nach dem Prinzip der Deprez-d'Arsonval-Galvanometer konstruierter Apparat

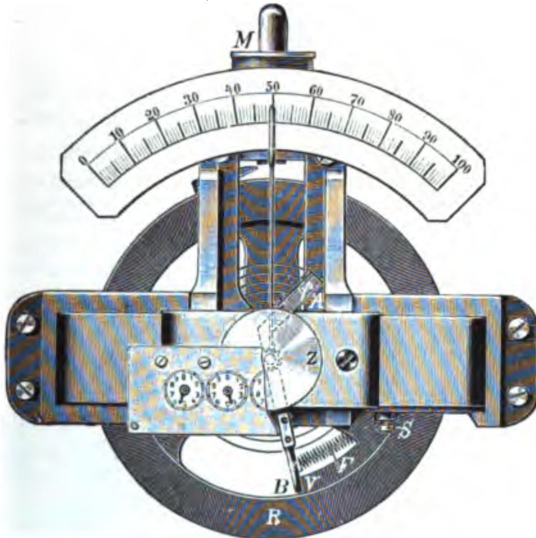


Fig. 152. Registriervorrichtung des Präzisions-Elektrizitätszählers von Siemens & Halske.

dient. Dieser Strom- oder Energiemesser besitzt einen Zeiger, der einen der zu messenden Stromstärke (i) oder dem jeweiligen Energieverbrauch (i · e) streng proportionalen Ausschlag macht. Dieser Zeiger wird periodisch von einem Elektromotor in kurzen Zeitabständen in die Nulllage zurückgebracht, und dabei jedesmal ein Zählrad um denselben Ausschlagwinkel gedreht.

Die Summe dieser Drehungen in einem beliebigen Zeitabschnitte ist somit dem Elektrizitätsverbrauche proportional und kann an einem einfachen Zählwerke abgelesen werden.

Die Registrierung der Zeigerausschläge wird nun in folgender Weise ausgeführt:

Durch die periodisch wirkende Kraft eines kleinen Elektromotors bewegt, führt ein Mitnehmer A B (Fig. 152) aller $^{3}/_{4}$ Sekunden den Zeiger auf den Nullpunkt zurück. An diesem Mitnehmer A B, welcher mit dem Zählrade Z auf einer gemeinsamen Achse sitzt, befindet

sich eine kleine Feder f, die im allgemeinen etwas von dem fein gerauhten Zählrade Z absteht. Sobald diese Feder den Zeiger trifft, wird sie gegen das Zählrad gedrückt, letzteres mitgenommen und so der Winkel, um welchen der Zeiger jedesmal vom Nullpunkt abweicht, durch das Zählrad registriert. An dem Zählrade ist mit passender Übersetzung ein Zählwerk angebracht.

Der Zeiger stellt sich vollkommen frei ein und wird erst in dem Augenblicke, in welchem der Mitnehmer ihn berührt, mit dem Zählwerke verbunden.

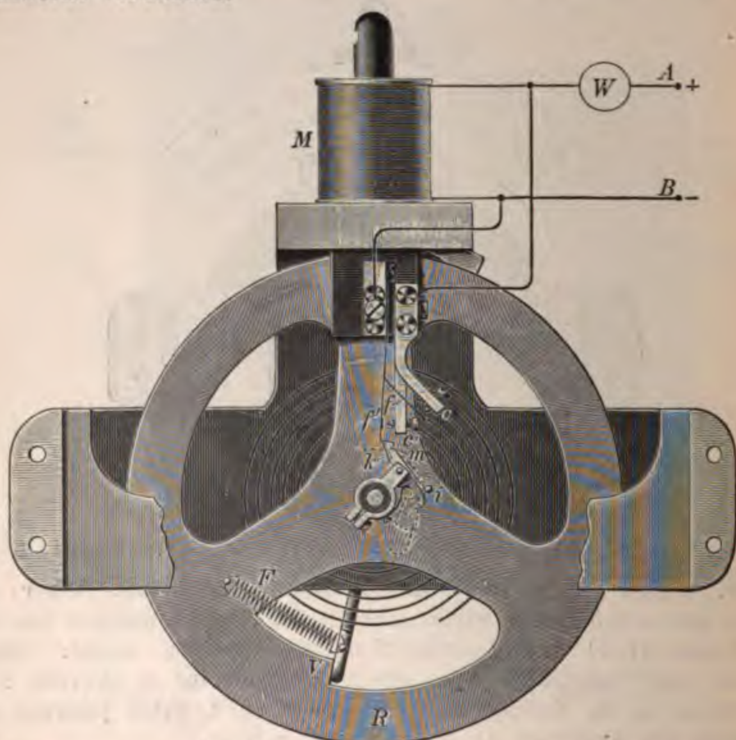


Fig. 153. Schaltung des Präzisions-Elektrizitätszählers und Wirkung des Antriebes.

Da der periodische Elektromotor den Zeiger mittels des Mitnehmersgenau auf Null zurückführen muss, so müsste derselbe stets ganz genau gleiche Amplituden machen; da dies nun praktisch unmöglich zu erreichen ist, muss man hier ein Glied einführen, das ein freies Ausschwingen der Unruhe des Motors erlaubt. Zu diesem Zwecke ist hier der Mitnehmer A B (Fig. 152 und 153), der umgebogen ist und in zwei Lagern liegt, durch eine Feder F an einen Vorsprung V des Unruherades R angedrückt. An der linken Seite

kann die Unruhe nebst Bügel nun frei ausschwingen, an der rechten dagegen findet der Bügel einen Anschlag S, welcher der Nullstellung des Zeigers genau entspricht; die Unruhe selbst kann frei ausschwingen. Werden grössere Ausschläge des Strom- oder Energiezeigers registriert, so wird der Zeiger nicht ganz auf Null zurückgeführt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Zähler in solchen Fällen zu wenig zählt. Es findet eine geringe Durchbiegung der Kupplungsfeder statt. Diese Durchbiegung hängt von der Grösse der Gegenkraft ab, welche der auf Null zurückgeführte Zähler ausübt, und diese ist um so grösser, je grösser der jeweilige Ausschlag des Zeigers ist. Die Durchbiegung selbst veranlasst jedoch keinen Fehler in den Angaben des Zählers.

Der periodisch wirkende Motor ist sehr einfach. Er besteht nur aus einer schweren Unruhe, einer Feder und dem nötigen Bewegungsmechanismus, einem Anker von besonderer Form und der Kontakteinrichtung. Um Funkenbildung zu vermeiden, ist die Schaltung angewandt, welche Fig. 153 zeigt. M ist der Elektromagnet, W der Vorschaltwiderstand, A und B sind die beiden Stromleitungen. Jetzt liegt parallel hierzu eine Kurzschlusseinrichtung, eine Feder f, die im allgemeinen auf dem Kontakt c aufliegt. Also ist zum Elektromagneten ein Kurzschluss hergestellt. Sobald nun hier der Mitnehmer m ankommt, wird der Kontakt abgehoben, infolgedessen wird der Kurzschluss des Elektromagneten aufgehoben. Der Strom passiert den Magneten, ein Stromstoss erfolgt und treibt die Unruhe an. Der Stromstoss erfolgt in dem Augenblicke, in welchem die Unruhe ihre Gleichgewichtslage passiert. Beim Rückgange (von links nach rechts) kann die kleine Feder k des Mitnehmers m frei durchgehen und macht keinen Kontakt. Funken treten nicht auf, weil der Extrastrom in dem Kurzschluss verläuft. Nebenbei ist der Strom, der den Motor bethätigt, sehr schwach. Bei einem Zähler für 100 V Spannung gebraucht man etwa 1 Watt für den Motor.

Der periodische Motor muss wechselnde Arbeit verrichten, je nachdem der Zeiger bei kleinen oder grossen Ausschlägen transportiert wird; er muss sich seine Amplitude selbstthätig regulieren, und das macht er dadurch, dass er sich so viel Strom nimmt, wie er zu der bestimmten Amplitude notwendig hat. Wenn er nun eine zu grosse Amplitude macht, so schlägt der kleine Mitnehmer m gegen einen Stift i an. Jener dreht sich dadurch ein wenig um, stellt sich in die in der Fig. 153 punktiert gezeichnete Lage ein, und deshalb geht beim nächsten Durchgang die kleine Feder k unter der Kontaktfeder f′ durch. Der Motor bekommt dann keinen Strom mehr, so lange der Schwingungsbogen eine gewisse Grösse überschreitet. So-

bald die Amplitude wieder abnimmt, wird der Kontakt wieder hergestellt, d. h. der Motor reguliert seine Amplitude selbst, er nimmt so viel Strom, wie er braucht, und wenn nach längerem Betriebe die Reibungen eines solchen Motors etwas stärker auftreten würden, würde er sich einfach etwas öfter Strom holen.

Aus diesem Grunde haben auch Spannungsschwankungen der gewöhnlichen Art auf die Schwingungsdauer der Unruhe keinen merklichen Einfluss.

Grosse Schwierigkeit verursachte die Lagerung der Unruhe; weil letztere eine ziemlich grosse Masse besitzt.

Feine Spitzen und Zapfen, welche man zur Lagerung der Unruhe auf Saphiren, Rubinen u. dergl. verwendet, können selbstverständlich bei einer schweren Masse den Transport nicht aushalten. Durch Anwendung von Kugellagern hat man es schliesslich erreicht, trotz Anwendung von starken Achsen ein sehr gutes Schwingen der Unruhe herbeizuführen. Der Zähler kann ohne jegliche Arretierung jeden Transport vertragen.

Wenn die Spannung nachlässt, hört der Strom auf; der Zähler muss aber, wenn die Spannung wieder eintritt, von selbst angehen. Dies ist in folgender Weise erreicht: Wenn man die Unruhe ausschwingen lässt, so bleibt sie so stehen, dass der Kontakt in Ruhe abgehoben ist; der Kurzschluss ist in Ruhe aufgehoben, der Strom kann durch den Magnet durchgehen und die Bewegung hervorrufen. Diese Stellung beim Angehen zeigt Fig. 153.

Was nun das Messinstrument anbetrifft, dessen Ausschläge durch die beschriebenen Vorrichtungen summiert werden sollen, so ist jedes zu verwenden, dessen Ausschläge proportional der Stromstärke sind, und das eine genügend starke Dämpfung hat.

Bei den Ampèrestundenzählern benutzt man Strommesser nach Art der d'Arsonval-Galvanometer, bei denen der Ausschlag vollkommen proportional der Stromstärke ist.

Für die Wattstundenzähler wird ein Wattmeter benutzt, wie solche früher Kap. XII, Abschn. 4, S. 230, beschrieben worden sind. Ein solches zeigt Fig. 158; es ist nichts anderes als ein Deprez-d'Arsonval-Galvanometer, mit dem Unterschiede, dass an Stelle der permanenten Stahlmagnete Elektromagnete verwendet sind und diese von dem Spannungsstrom umflossen werden.

Das Feld dieses Instrumentes liegt in einem Teile der Magnetisierungskurve, in dem die Magnetisierung der magnetisierenden Kraft proportional ist.

Wir haben hier also ein Instrument mit sehr gut geschlossenem magnetischem Kreise. Damit nun nicht infolge der magnetischen Hysteresis gleichen magnetisierenden Kräften ungleiche Punkte der

Magnetisierung entsprechen, je nach der magnetischen Vorgeschichte, ist bei diesen Instrumenten der einfache Kunstgriff angewandt worden, dass jedesmal durch den periodischen Motor selbst kurz vor der Registrierung der Elektromagnet kurz geschlossen wird (Fig. 154 bei A); dann fällt die Kurve der Magnetisierung bis zu dem ihr

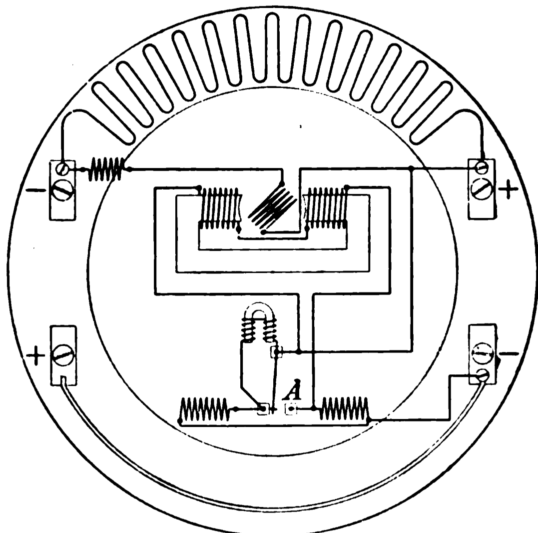


Fig. 154. Kurzschlussstellung vor der Registrierung.

zugehörigen Betrag der Remanenz herunter, und die bei der Registrierung herrschende Magnetisierung befindet sich immer in dem aufsteigenden Aste der Magnetisierungskurve.

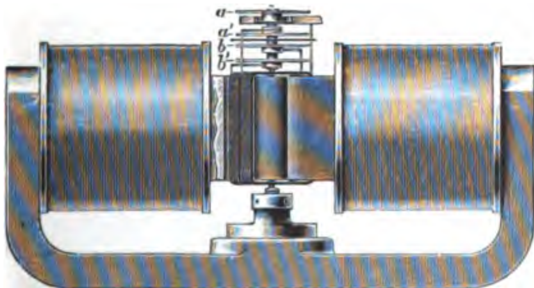


Fig. 155. Präzisions-Wattstundenzähler für Dreileitersystem von Siemens & Halske.

Bei den Dreileiterzählern sind die Instrumente so ausgeführt, dass die Spule, die sich im magnetischen Felde bewegt, in zwei Teile gespalten ist, von welchen jeder von einem Strom durchflossen wird, welcher dem im Hauptleiter proportional ist. Die beiden Ströme werden durch je ein Federpaar aa′ und bb′ zugeführt (Fig. 155).

Der Temperaturkoëffizient der Zähler ist sehr klein. Die Nebenschlüsse sind aus Manganin hergestellt, und die anderen Teile in dem Instrument sind aus Materialien hergestellt, die einen sehr kleinen Temperaturkoëffizienten haben. Ebenso ist der Wattverbrauch sehr klein.

Fig. 156. Aeusseres des Ampèrestundenzählers von Siemens & Halske.

Die Fig. 156 zeigt die äussere Ansicht des Zählers. Derselbe ist luftdicht verschlossen und plombiert und braucht bei der Montage durchaus nicht geöffnet zu werden.

Fig. 157 und 158 zeigen einen geöffneten Ampèrestundenzähler (Zweileiter) und einen Wattstundenzähler (Dreileiter). Die Nebenschlüsse sind halbkreisförmig um das eigentliche Zählergehäuse herumgelegt und sind der besseren Ventilation wegen mit einem fein durchlöcherten Mantel umgeben. (Vergl. Fig. 156.)

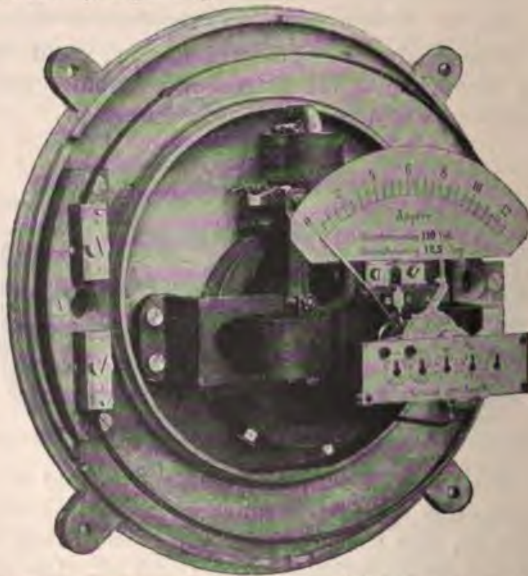


Fig. 157. Präzisionsampèrestundenzähler (Zweileiter) von Siemens & Halske.

Die Zähler gehen bei 0,3 % der normalen Belastung an, und der Fehler bleibt stets unter 1 %. Auch verträgt der Apparat erhebliche Überanstrengung.[1])

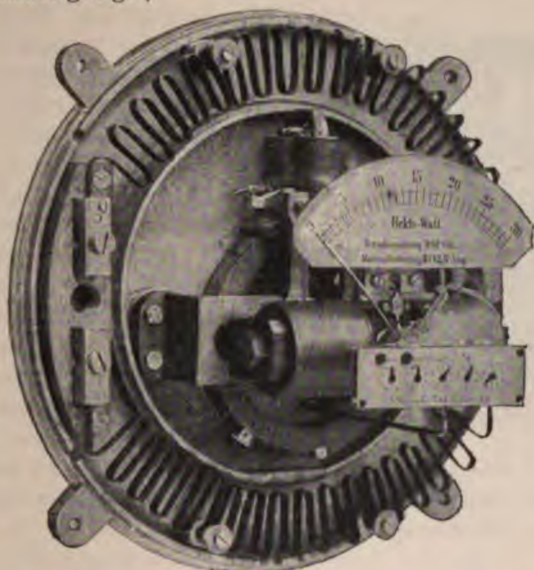


Fig. 158. Wattstundenzähler (Dreileiter) von Siemens & Halske.

C. Uhrenzähler.

13. Die Elektrizitätszähler von Prof. Dr. Aron (1884).

Der Apparat bestand in seiner ursprünglichen einfachsten Form aus einer gut gehenden Pendeluhr, deren Gang durch den zu messenden Strom beeinflusst wurde.

Wie bekannt, ändert sich die Schwingungsdauer eines Pendels sowohl durch eine Vergrösserung der Pendellänge, als auch durch eine Veränderung der Schwerkraft. Eine ähnliche Wirkung wie die Veränderung der Schwerkraft kann man aber dadurch erzielen, dass man auf das Pendel eine zweite und zwar eine magnetische Kraft wirken lässt, die sich entweder zur Erdschwere addieren oder von ihr subtrahieren kann. Im ersteren Falle wird ein derartig beeinflusstes Pendel schneller, im zweiten Falle wird es langsamer schwingen, als unter dem Einflusse der Erdschwere allein.

Bei dem älteren Aron'schen Elektrizitätszähler ist die Einrichtung so getroffen, dass das Pendel in seinem Gange beschleunigt wird, und

[1]) Wegen weiterer Einzelheiten vergleiche man die Originalabhandlung von Raps, E T Z, Bd. XXI, 1898, S. 148.

zwar ist zu diesem Zwecke an dem Pendel der Uhr ein Stahlmagnet angebracht, der mit dem einen Pol über einer feststehenden Rolle mit dickem Drahte schwingt, durch welche der zu messende Strom geleitet wird. Solange kein Strom durch die Rolle fliesst, wirkt der Magnet nur wie ein schwerer Körper, und die Uhr hat normalen Gang; wird jedoch Strom durch die Rolle geleitet, so wirkt auf das Pendel, ausser der Schwerkraft, noch die Anziehungskraft der unter ihm befestigten Rolle, und die Uhr eilt gegen eine normal gehende vor. Die Abweichung der Uhr ist proportional der Stromstärke[1]), sodass die Voreilung ein vollkommenes Mass für die durch den Apparat gegangene Elektrizitätsmenge ist.



Fig. 159. Aelterer Aronzähler.

Der Apparat besteht im wesentlichen aus zwei Pendeln; dieselben sind genau auf gleiche Schwingungsdauer abgeglichen. Das eine Pendel (in der Fig. 159 das linke) ist ein gewöhnliches; das andere trägt am unteren Ende als schweren Körper einen Stahlmagneten. Die Pendel werden durch je ein

---

[1]) Bekanntlich ist die Zahl n der Halbschwingungen, die ein Pendel in t Sekunden vollführt:

$$n = \frac{t}{\pi}\sqrt{\frac{P\,l}{T}},$$

wenn P das Gewicht des Pendels, l die Entfernung des Schwerpunktes von der Achse und T das Trägheitsmoment des Pendels in Bezug auf die Drehachse bedeutet.

Befindet sich aber am anderen Ende des Pendels ein Magnet, dessen magnetisches Moment M ist, und entwickelt ein unter dem Pendel befindliches Solenoid ein Magnetfeld, so wird die beschleunigende Kraft der Schwere um einen Betrag a · M · i vermehrt, wenn i die Stärke des Stromes ist, der durch das Solenoid fliesst, und mit a eine Konstante bezeichnet wird, die von den Abmessungen der Spule und des Pendels und der gegenseitigen Entfernung beider abhängig ist. Dann ist die Zahl N der Halbschwingungen in der Zeit t:

$$N = \frac{t}{\pi}\cdot\sqrt{\frac{P\,l + a\,M\,i}{T}} = \frac{t}{\pi}\cdot\sqrt{\frac{P\,l}{T}}\cdot\left(1+\frac{a\,M\,i}{P\cdot l}\right)^{1/2}$$

Setzt man $\frac{a\cdot M}{P\cdot l} = \frac{1}{C}$ und entwickelt den in den Klammern stehenden Ausdruck nach dem binomischen Satze in eine Reihe, so erhält man:

$$N = n\cdot\left(1+\frac{i}{2\,C}-\frac{i^2}{8\,C^2}+-\cdots\right).$$

Ist C genügend gross, d. h. der Unterschied der Schwingungsdauer beider Pendel klein, so kann man sich mit den beiden ersten Gliedern der Reihe begnügen und erhält:

$$N = n\cdot\left(1+\frac{i}{2\,C}\right) \text{ oder } n\cdot i = 2\,C\cdot(N-n).$$

Die Elektrizitätsmenge, die in der Zeit t (während n Schwingungen des nur unter der Anziehung der Erde schwingenden Pendels) den Apparat durchflossen hat, ist somit der Differenz der Schwingungszahlen beider Pendel proportional.

Uhrwerk, das durch Federkraft getrieben wird, im Gang erhalten und wirken auf ein gemeinschaftliches Zählwerk, welches die Differenz ihrer Schwingungen zählt. Solange kein Strom die im Apparat unter dem magnetischen Pendel angebrachte Rolle durchfliesst, schwingen beide Pendel gleich, und das Zählwerk bewegt sich nicht. Wenn jedoch der Strom wirkt, wird das magnetische Pendel in seiner Schwingungsdauer beeinflusst und zwar so, dass es desto schneller schwingt, je mehr Strom den Apparat durchfliesst. Das Zählwerk registriert die Voreilung des magnetischen Pendels[1]) und ist so eingerichtet, dass das oberste Zifferblatt die Einer, das zweite die Zehner, das dritte die Hunderter u. s. w. angiebt. Ein Faktor, der durch Aichung bestimmt ist, giebt durch blosse Multiplikation leicht die gelieferte Elektrizitätsmenge. Ist dieser Faktor 1, so liest man direkt ab.



Fig. 160. Schaltung des älteren Aronzählers im Dreileitersystem.

Das Uhrwerk zum Betriebe der Pendel geht ca. 40 Tage, braucht also nur monatich aufgezogen zu werden.

Diese Apparate sind für das Zweileitersystem und Gleichstrom bestimmt und zählen die Ampèrestunden, die der Leitung entnommen werden. Dementsprechend haben sie nur eine Rolle, welche von dem zu messenden Strome durchflossen wird. Die Angaben dieser Zähler sind von der Betriebsspannung unabhängig.

Bei dem Zähler für Dreileitersystem werden zwei Magnete mit zwei Rollen angewendet (Fig. 160). Dabei hat sich herausgestellt, dass man richtige Resultate nur dann erhält, wenn die beiden über den Rollen schwingenden Pole entgegengesetzte Polarität haben.

[1]) Die Summierung der Gangdifferenzen geschieht durch folgende Einrichtung. (Vergl. Fig. 161.) Durch jedes der beiden Uhrwerke wird je eines der beiden, lose auf der horizontalen Achse sitzenden Kronenräder K_1 und K_2 in Bewegung gesetzt. Die Drehrichtung von K_1 ist der von K_2 entgegengesetzt. In beide Kronenräder greift gleichzeitig das sogenannte Planetenrad S ein, das durch ein Gegengewicht G genau ausbalanciert ist. Der das Planetenrad S tragende Arm ist auf der horizontalen Zählerachse befestigt. Solange beide Pendel genau gleich schwingen, bewegen sich beide Kronenräder K_1 und K_2 mit gleicher Geschwindigkeit, und das Planetenrad S dreht sich mit, seine Achse bleibt aber stehen. Sowie sich aber eine Gangdifferenz geltend macht, rollt das Planetenrad mit einer dieser Gangdifferenz proportionalen Geschwindigkeit an den Kronenrädern hin und bewegt dadurch das auf derselben Achse befestigte, zum Zählwerk gehörende Zahnrad Z.

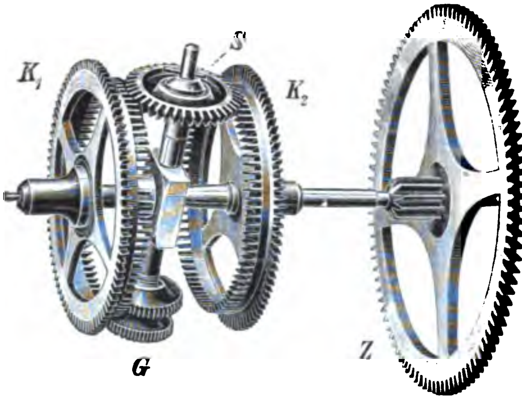


Fig. 161. Die Summierung der Gangdifferenzen zweier Uhrwerke.

Nach demselben Prinzip hat Prof. Aron auch Apparate konstruiert, welche Wattstunden sowohl bei Gleichstrom als auch bei Wechselstrom messen (Fig. 162).

Dieser Wattstundenzähler besteht, wie der Ampèrestundenzähler, im wesentlichen aus zwei Pendeln von gleicher Schwingungs-



Fig. 162. Wattstundenzähler nach Aron.

dauer. Das linke Pendel ist ein gewöhnliches mit einem Messinggewicht am unteren Ende; das rechte trägt ein gabelförmiges Messingstück, in dem eine Rolle mit feinem Drahte befestigt ist.

Diese Rolle mit dünnem Drahte wird von einer zweiten Rolle umgeben, innerhalb welcher sie unbehindert schwingen kann. Die innere Rolle liegt in einem Nebenschluss von hohem Widerstande zur Stromleitung; der diese Rolle durchfliessende schwache Strom ist der jeweilig herrschenden Spannung proportional. Die äussere Rolle ist mit starkem Draht umwickelt und wird vom Hauptstrome durchflossen. Die gegenseitige Einwirkung der beiden Rollen bewirkt eine Veränderung in der Schwingungsdauer des Messpendels, welche dem Produkt der jeweilig herrschenden Spannung und Stromstärke, also der Zahl der verbrauchten Watt, proportional ist.

Diese Wattstundenzähler haben den grossen Vorzug, dass sie für Gleichstrom und für Wechselstrom gleichmässig brauchbar sind, und dass sie von dem Charakter der Maschine, insbesondere von der Anzahl der Stromwechsel, unabhängig sind, sodass sie demgemäss in allen Fällen anwendbar bleiben. Nach demselben Prinzip sind auch Wattstundenzähler für das Dreileitersystem und für Drehstrom konstruiert worden.

Diese älteren Aron'schen Elektrizitätszähler genügen den praktischen Ansprüchen schon in jeder Beziehung.

Bei den internationalen Wettbewerben um den besten Elektrizitätszähler, die in der Stadt Paris in den Jahren 1889 und 1891 veranstaltet worden waren, sind dieselben, ebenso wie (1891) der unter 9. erwähnte E. Thomson'sche Apparat mit dem ersten Preise ausgezeichnet worden.

14. Die neueren Wattzähler von Aron.

Neuerdings hat Aron seine Uhrenwattzähler, ohne das Grundprinzip der älteren Konstruktion zu verlassen, dadurch wesentlich verbessert, dass er dieselben auf elektrischem Wege aufziehen lässt und dass er eine Einrichtung angebracht hat, durch welche die Gangfehler beseitigt werden, sodass die Zähler auch unreguliert richtig gehen.

Er verwendet neuerdings kurze leichte Pendel von etwa 10 *cm* Länge, die in einer Stunde 12000 Schwingungen machen. Infolgedessen können diese Zähler ohne besondere Arretierung der Pendel verschickt werden, auch gehen sie von selbst an, sowie die richtige Spannung zur Wirkung kommt.

Bei so kurzen Pendeln macht sich der Einfluss der Gangänderung durch die elektrodynamische Wirkung sehr stark geltend, sodass in

der Formel für die geänderte Schwingungszahl (vergl. die Anmerkung zu S. 258)

$$N = n \cdot \left(1 + \frac{i}{2C} - \frac{i^2}{8C^2}\right)$$

das Glied zweiter Ordnung nicht mehr vernachlässigt werden kann.

Beeinflusst man nun beide Pendel durch den zu messenden Strom, aber in entgegengesetztem Sinne, so erhält man für die Differenz der Schwingungszahlen beider Pendel:

$$N_1 - N_2 = n \cdot \left(1 + \frac{i}{2C} - \frac{i^2}{8C^2}\right) - n \cdot \left(1 - \frac{i}{2C} - \frac{i^2}{8C^2}\right)$$

$$N_1 - N_2 = n \cdot \frac{i}{C}.$$

Die Differenz der Schwingungszahlen beider Pendel ist somit der zu messenden Stromstärke proportional. Diese Differenz aber ist es, die vom Zählwerke registriert wird.

Bei Zweileitersystemen werden für den einen Stromkreis beide Pendel benutzt. Die am Pendel befindlichen Schwachstromspulen werden in gleichem Sinne, die darunter befindlichen Starkstromspulen in entgegengesetzter Richtung vom Strome durchflossen. Benachbarte magnetische Kräfte heben sich in ihrer Wirkung auf den Zähler dadurch nahezu vollkommen auf, dass sie beide Pendelspulen in gleichem Sinne beeinflussen, und in der Differenz der Wirkungen, die vom Zähler registriert wird, dieser Einfluss verschwindet.

Bei Drei- und Mehrleitersystemen wird für jeden Stromkreis je ein Pendel benutzt.

Um den Gangfehler zu eliminieren, damit der Zähler auch unreguliert richtig misst, wird in gewissen gleichen Zeitabschnitten (aller 20 Minuten) die Stromrichtung in den im Nebenschlusse liegenden Pendelspulen und gleichzeitig auf mechanischem Wege die Drehrichtung des Zählwerkes geändert. Infolge der doppelten Umkehrung registriert das Zählwerk die Gangdifferenz beider Pendel und damit auch den Stromverbrauch in demselben Sinne weiter; der Gangfehler aber verschwindet, weil das Pendel, welches vorher eine Zeit lang durch den Strom beschleunigt worden ist, hierauf eine ebenso lange Zeit hindurch verzögert wird.

Der neue Aronzähler ist ein reiner Wattmesser, er enthält keine Dauermagneten mehr. Seine Angaben sind, weil er dauernd im Gange ist, von der Reibung unabhängig, und er registriert auch den kleinsten Verbrauch ebenso sicher, als den grössten zulässigen. Der Energieverbrauch ist nur äusserst gering, er beträgt nur 1 bis 2 Watt.

Die nebenstehende Fig. 162a zeigt die äussere Erscheinung dieser neuen Zähler.

Bezüglich der äusserst geistreich ausgedachten, mechanischen Einzelheiten des Apparates verweisen wir auf die Originalabhandlung.[1])

In Fig. 163 ist die Schaltung des Apparates erläutert. S S sind die in entgegengesetzter Richtung vom zu messenden Starkstrom durchflossenen feststehenden Spulen. s s sind die in gleichem Sinne



Fig. 162a. Der neue Aronzähler.

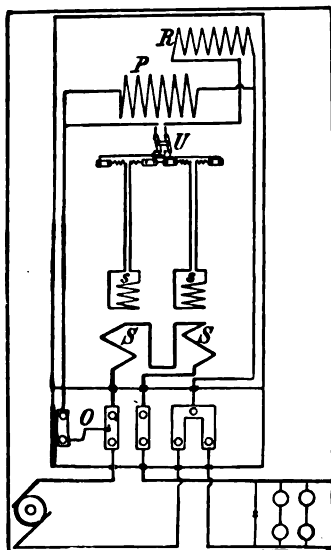


Fig. 163. Schaltung des neuen Aronzählers.

vom Schwachstrom durchflossenen Pendelspulen, die mit dem grossen Widerstand R einen Nebenschluss zu dem zu messenden Strome bilden. Den Pendelspulen s s wird durch dünne, äusserst biegsame Drähte, die an der Pendelstange herablaufen, der Strom zugeführt. P ist die Wickelung des Aufziehmagneten. U ist der durch eine Excenterwelle bethätigte Umschalter, der alle 20 Minuten die Stromrichtung in den Spulen s s umkehrt.

[1]) Aron, Vervollkommnete Uhrenzähler, E T Z Bd. XVIII, 1897, S. 372.

XIII. Kapitel.

Widerstandsmessungen.

1. Einteilung der verschiedenen Fälle. Normalwiderstände. Regulierwiderstände.

Man muss verschiedene Methoden zur Bestimmung des Widerstandes anwenden, je nachdem in dem zu messenden Widerstande gleichzeitig elektromotorische Kräfte thätig sind, oder dies nicht der Fall ist. Auch für die Ermittelung sehr grosser oder sehr kleiner Widerstände sind besondere Wege einzuschlagen. Wesentlich erleichtert werden derartige Messungen neuerdings dadurch, dass die Physikalisch-Technische Reichsanstalt in Charlottenburg Normalwiderstände mit grosser Zuverlässigkeit justiert, die als Masseinheiten benutzt werden können.

Die nebenstehende Fig. 164 zeigt einen solchen Normalwiderstand für 100 ω; in ähnlicher Einrichtung werden Normalwiderstände von 0,1 ω bis 10000 ω hergestellt. Den eigentlichen Widerstand bildet ein Draht, der aus einer Legierung besteht, die einen sehr niedrigen Temperaturkoëffizienten besitzt[1]) (Patentnickel, Manganin, Konstantan) und sehr unveränderlich ist.

Die Zuleitungen sind aus Kupfer hergestellt und so dick gewählt, dass ihr Widerstand vernachlässigt werden kann. Für jeden Normalwiderstand ist die Temperatur angegeben, bei der er genau richtig ist; ausserdem wird der Temperaturkoëffizient α mitgeteilt. Säurefreies Erdöl umgiebt den Draht, und ein in die Flüssigkeit eintauchendes Thermometer gestattet die Temperatur abzulesen.

---

[1]) Neusilber und alle zinkhaltigen Legierungen (Nickelin) verändern den Widerstand beim Wickeln und mit der Zeit. Weniger ist dies der Fall bei den Legierungen aus Kupfer mit Nickel und Mangan. Mit der Zeit verliert sich die Veränderlichkeit der Widerstandsmaterialien. Man altert sie künstlich, wenn man sie nach der Wickelung längere Zeit auf 100⁰ erhitzt.

Nickelin k = 0,43, α = 0,00023 } (beide von Dr. Geitner
Rheotan k = 0,51, α = 0,00024 } in Aue, Sachsen),
Patentnickel (75 % Kupfer, 25 % Nickel) } k = 0,40 bis 0.43,
Manganin (84 % Kupfer, 12 % Mangan, 3,5 % Nickel) } α = 0,000014,
Konstantan (50 % Kupfer, 50 % Nickel) k = 0,50, α = 0,000025.

Über die Bedeutung von k und α vergl. S. 10.

Auch Vorschalt- und Regulierwiderstände werden neuerdings viel-
ıch aus einer der vorgenannten Legierungen hergestellt, die hohen
pezifischen Widerstand und kleinen Temperaturkoëffizienten haben.

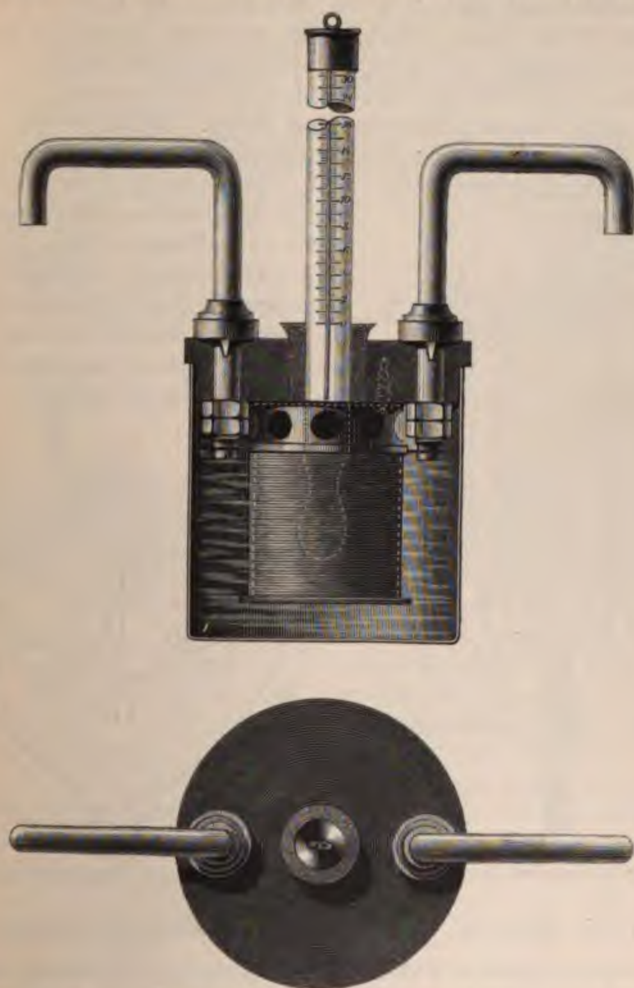


Fig. 164. Normalwiderstand der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt für 100 ω.

Die umstehende Abbildung, Fig. 165, zeigt die Einrichtung
nes kleinen Regulierwiderstandes, wie solche z. B. in den Neben-
hluss dynamoelektrischer Maschinen zur Regelung der Spannung
ngeschaltet werden. Der Draht ist zu Spiralen zusammengewickelt,
d diese sind unter Anwendung isolierender Unterlagen an einem

Rahmen aus unverbrennlichem Materiale, meist Eisen, befestigt. Von den Enden der Spiralen führen starke Drähte zu den Knöpfen, auf welche eine Kontaktkurbel mit hölzernem Griffe durch eine Feder kräftig aufgedrückt wird. Durch Bewegung der Kurbel nach links kann der Strom ganz unterbrochen werden; verschiebt man die Kurbel nach rechts, so wird immer weniger Widerstand in den Stromkreis eingeschaltet. Meist hindert ein Anschlag, dass der Schieber sich über 0 hinaus bewegen kann. Bei Widerständen für stärkere Ströme verwendet man entweder Streifen, die aus Drahtnetzen (Drahtgaze) hergestellt sind, oder gewellte Blechstreifen an Stelle der Drahtspiralen, oder auch Rohre aus Mangan.

Auch Gruppen parallel geschalteter Glühlampen (Lampenbatterien) werden als Widerstände benutzt. Diese haben den Vorzug, fast ganz frei von Selbstinduktion zu sein.

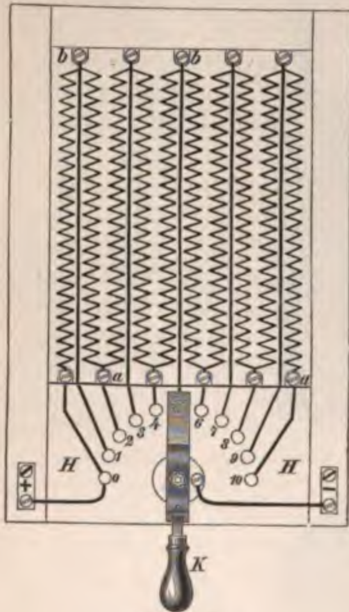


Fig. 165.
Kleiner Regulierwiderstand.

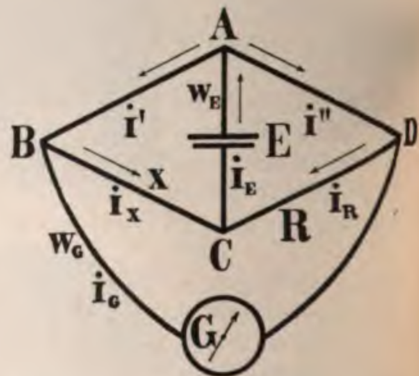


Fig. 166.
Schaltungsschema der Wheatstone'schen Brücke.

2. Die Messung von Widerständen mittlerer Grösse.

Die weitaus meisten Widerstände, in welchen keine EMK während der Messung thätig ist (Drähte, Drahtspulen, Anker ruhender elektrischer Maschinen), werden mit der Wheatstone'schen Brücke gemessen (vergl. Kap. I, Abschn. 22, S. 23), deren Schaltungsschema wir hier nochmals wiedergeben (vergl. Fig. 166).

Mit den Punkten B und C verbindet man durch passende Zuleitungsdrähte den zu messenden Widerstand. Zwischen die Punkte C und D schaltet man durch kurze Drahtstücke einen sogenannten

Widerstandskasten und wählt diese Zuleitungen so dick, dass deren Widerstand vernachlässigt werden kann.

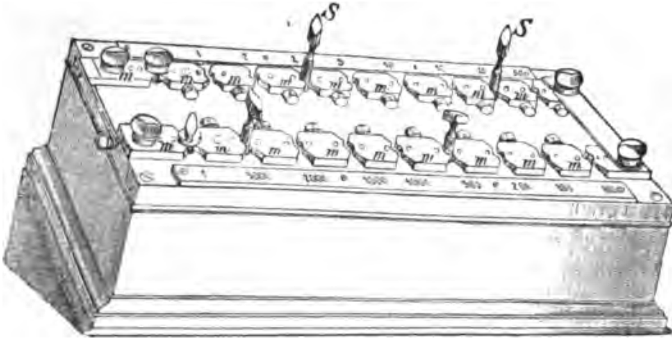


Fig. 167. Widerstandskasten.

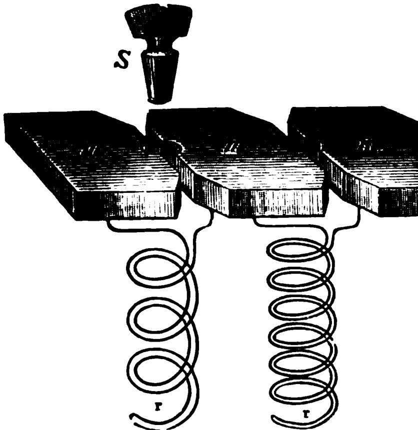


Fig. 168. Bifilare Wickelung der Widerstandsspulen.

Die Einrichtung solcher Widerstandskästen zeigt die beistehende Fig. 167. Die Drähte, welche die gewünschten Widerstandsgrössen darstellen, werden auf Holzrollen gewickelt. Um magnetische Wirkungen der Drahtspulen auszuschliessen, werden die übersponnenen Drähte in ihrer Mitte zusammengelegt und nun doppelt genommen aufgewickelt (bifilare Wickelung, vergl. Fig. 168). Die Grössen der einzelnen Widerstände werden in derselben Weise abgestuft wie die Gewichtsstücke eines Gewichtssatzes. Man wählt also z. B. folgende Widerstände:

0,1 ω	0,2 ω	0,2 ω	0,5 ω
1 ω	2 ω	2 ω	5 ω
10 ω	20 ω	20 ω	50 ω
100 ω	200 ω	200 ω	500 ω
1000 ω	2000 ω	2000 ω	5000 ω.

Die Enden der einzelnen Rollen r lötet man an dicke Kupferdrähte, die an starke Messingklötze m befestigt sind, oder verschraubt sie unmittelbar an diese Klötze. Diese Messingstücke m sitzen auf einer Hartgummiplatte und stehen um einige Millimeter voneinander ab. In dieselben sind Erweiterungen von der Gestalt eines

halben Kreiskegels eingefräst; in diese Öffnungen können konische Messingstöpsel S S fest eingesetzt werden. Durch solche Widerstände, zwischen deren Enden durch das Einsetzen des Stöpsels eine Verbindung von verschwindend kleinen Widerständen hergestellt ist, fliesst kein Strom, während die Widerstände, deren Stöpsellöcher offen sind, in den Stromkreis eingeschaltet sind.

In der umstehenden Fig. 167 sind z. B. offen die Stöpsellöcher 2000, 1000, 1000, 200, 100, 100, 50, 10, 10, 5, 2, 1, während die übrigen Widerstände ausgeschaltet sind; der Widerstandskasten (auch Stöpselrheostat genannt) bietet somit einen Widerstand von 4478 ω dar.

Da sich in die Stöpsellöcher leicht Staub setzt und die Stöpsel durch Anfassen gelegentlich fettig werden, so bieten manchmal die Stöpselverbindungen nicht unmerkliche Widerstände von wechselnder Grösse dar. Um diesem Übelstande aus dem Wege zu gehen, der zumal bei sehr genauen Messungen störend werden kann, werden neuerdings sogenannte Dekadenwiderstände angefertigt, die aus je zehn Rollen von gleicher Grösse, z. B. von 0,1, 1, 10, 100, 1000 ω Widerstand, bestehen. Wie die nachstehende Abbildung Fig. 169 zeigt,

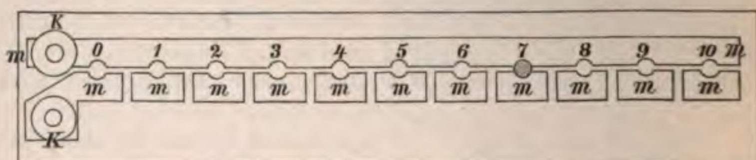


Fig. 169. Einfacher Dekadenwiderstand.

stehen 11 solche Messingklötze m einer massiven Schiene gegenüber. Durch Versetzen eines einzigen Stöpsels ist man dann imstande, 0 bis 10 der gleichen Widerstandsgrössen in den Stromkreis einzuschalten. In Fig. 169 geht der Strom z. B. durch die ersten 7 hindurch.

Die Fig. 170 stellt z. B. das Äussere eines Dekadenwiderstandes von Edelmann in München dar, bei dem die Stöpsel innerhalb der Dekaden durch Schleifkontakte ersetzt sind.

Die folgende Abbildung Fig. 171 zeigt die Schaltung der Wheatstone'schen Brücke, wie sie von Siemens & Halske bei deren Universalwiderstandskasten zur Anwendung gebracht wird. In dieser Fig. 171 ist x der zu messende Widerstand. Als Widerstände w′ und w″ ist auf beiden Seiten 100 ω eingeschaltet; man hätte jedoch für w′ sowohl wie für w″ die Widerstandsgrössen 1, 10, 100, 1000 wählen können, während in der Figur für R 100, 50, 10, 1, 0,5 und 0,1 gewählt ist. Für R kann, wie man sofort erkennt,

jeder Wert von 0,1 bis 10000 w gebildet werden. Da man ausserdem das Verhältnis $\frac{w'}{w''}$ zwischen 0,001 und 1000 wählen kann, ist man im stande, mit der dargestellten Brücke Widerstände x zwischen

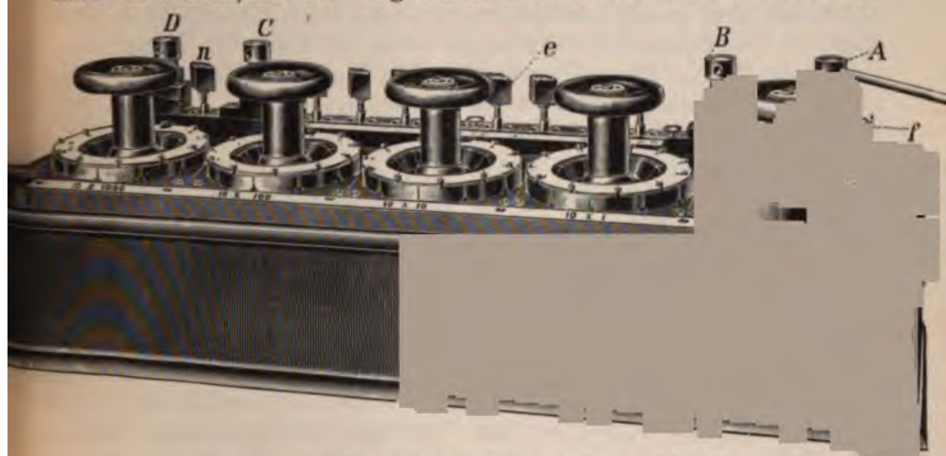


Fig. 170. Grosse Dekaden-Widerstandsbrücke von Edelmann.

0,0001 und 10000000 ω zu messen. In dem in Fig. 170 gezeichneten Beispiele wäre somit:

$$x = \frac{100}{100} \cdot 161,6 = 161,6\ \omega.$$

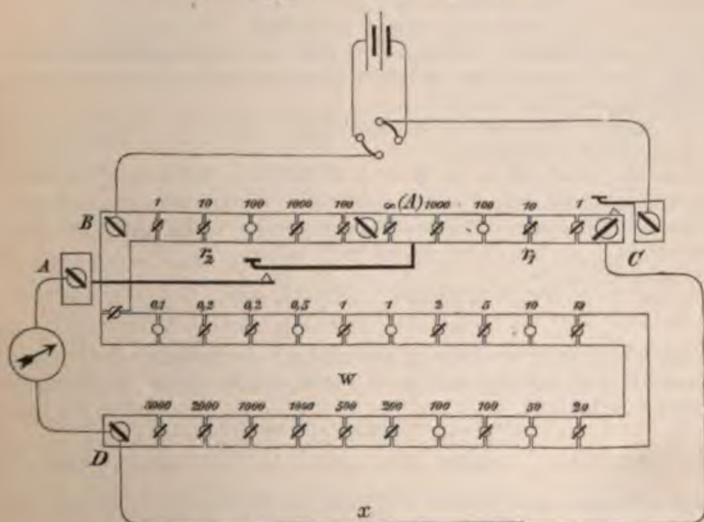


Fig. 171. Wheatstone'sche Brücke mit Widerstandskasten.

Die Brücke besitzt ausserdem zwei Stromschlüssel. Der eine liegt bei C und dient zum Einschalten der Batterie. Ihn schliesst man stets zuerst; dann schliesst man den zwischen A und (A) gelegenen Schlüssel, durch den das Galvanometer eingeschaltet wird. Zeigt sich nun am Galvanometer noch ein Ausschlag, so öffnet man zunächst den zwischen A (A) gelegenen und dann den bei C gelegenen Batterieschlüssel. Hierauf verändert man R und verfährt wieder so, bis das Galvanometer stromlos geworden ist.

Damit die Widerstände durch den Strom nicht erwärmt werden, schliesst man stets nur für ganz kurze Zeit.

Um thermoelektrische Wirkungen auszuschliessen, die leicht durch ungleiche Erwärmung verschiedener Teile der Brücke eintreten können, schaltet man gern in den Stromkreis der Batterie einen Kommutator ein, durch welchen man die Richtung des unverzweigten Stromes wechseln kann. Aus den mit verschiedenen Stromrichtungen erhaltenen Bestimmungen nimmt man dann das Mittel.

Der Widerstand der Zuleitungsdrähte, durch welche der zu messende Widerstand mit der Brücke verbunden worden ist, wird hierauf besonders bestimmt und von dem erstgefundenen Werte subtrahiert.

Wenn die Drahtrollen der Messbrücke noch aus Neusilber ($k = 0{,}00037$) hergestellt und die Rheostaten bei 20° C. richtig sind, darf man für genaue Messungen die Temperaturkorrektion nicht vernachlässigen. Dazu dient die Formel:

$$R_{20} = R_t \cdot [1 - 0{,}00037\ (20 - t)].$$

Beispiel: Um einen Widerstand zu messen, hat man $w' = 10$, $w'' = 100$ gewählt. Die Temperatur betrug 15° C., während der Rheostat für 20° C. richtig ist. Das Galvanometer wurde stromlos für die eine Stromrichtung, als man auf R umgestöpselt hatte

$$500 + 100 + 50 + 20 + 2 + 2 + 0{,}5\ \omega = 674{,}5\ \omega,$$

bei der anderen Stromrichtung:

$$500 + 100 + 50 + 20 + 2 + 2 + 0{,}2 + 0{,}1\ \omega = 674{,}3\ \omega.$$

Hierauf schaltete man den zu messenden Widerstand aus und vereinigte die Enden der Zuleitungsdrähte durch eine Klemme. Man fand bei der einen Stromrichtung: $0{,}5 + 0{,}2\ \omega = 0{,}7\ \omega$,

bei der andern: $0{,}5\ \omega$.

Dann ist $$R = \frac{674{,}5 + 674{,}3}{2} - \frac{0{,}7 + 0{,}5}{2} = 673{,}8\ \omega.$$

Dieser Widerstand ist etwas zu gross gefunden worden, weil die Temperatur des Rheostaten nur 15° statt 20° war. Die wirkliche Grösse des eingeschalteten Widerstandes R betrug:

$$673{,}8 \cdot [1 - 0{,}00037 \cdot 5] = 672{,}5.$$

Das Verhältnis $\frac{w'}{w''}$ ändert sich nicht, da beide Drähte aus gleichem Materiale hergestellt sind; somit ist x (bei 15° C.):

$$x_{15} = \frac{10}{100} \cdot 672{,}5 = 67{,}25\ \omega.$$

Als Galvanometer benutzt man ein empfindliches Spiegelinstrument oder wenigstens ein Galvanometer mit astatischem Nadelpaare[1]).

Hat man ein Galvanometer vom Widerstande W_G, eine Batterie vom Widerstande W_ε und ist die Grösse des zu messenden Widerstandes x ungefähr bekannt, so erhält man die grösste Empfindlichkeit bei der Brückenmessung, wenn man so nahe, als dies möglich ist:

$$w' = \sqrt{w_\varepsilon \cdot x \frac{w_G + x}{w_\varepsilon + x}}, \qquad w'' = \sqrt{w_\varepsilon \cdot w_G} \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wählt.

3. Die Messbrücken mit ausgespanntem Drahte.

Für Messungen, die keine grosse Zeit beanspruchen sollen, bei welchen aber auch keine grosse Genauigkeit verlangt wird (Blitzableiterwiderstände, Übergangswiderstände von Erdplatten) kann man sich einfacherer Apparate bedienen, bei welchen das Verhältnis w' : w" durch Teile eines ausgespannten Drahtes dargestellt und an Stelle von R ein bekannter Widerstand verwendet wird.

Die nebenstehende Abbildung erläutert den Stromlauf dieser Vorrichtungen. Man erkennt bei Vergleich von Fig. 172 mit Fig. 166 auf S. 266 sofort, dass Galvanometer und Batterie miteinander vertauscht sind; dies kann bei jeder Wheatstone'schen Brücke ohne weiteres geschehen.

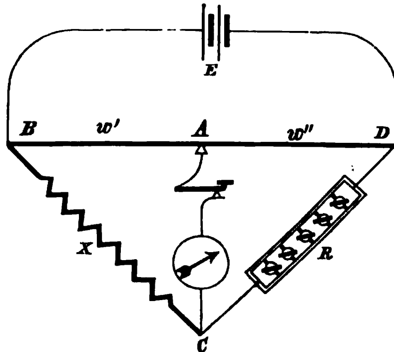


Fig. 172.
Messbrücke mit ausgespanntem Draht.

In den Zweig BC wird der zu messende Widerstand x eingeschaltet. Die beiden Widerstände w' und w" werden durch die Stücke BA und AD eines Drahtes von durchaus gleichem Querschnitt und gleichartiger Beschaffenheit dargestellt. A ist eine messerartige Schneide, die längs eines Massstabes auf dem Drahte verschoben werden kann. Im Zweige DC liegt ein Rheostat, der Widerstände von der Grösse 1, 10, 100, 1000 ω enthält. Die Punkte B und D sind mit den Polen einer Batterie E verbunden. Es ist alsdann, wenn das Galvanometer stromlos ist:

$$\frac{x}{R} = \frac{w'}{w''}, \text{ oder } x = \frac{w'}{w''} \cdot R \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

---

[1]) Auch das Torsionsgalvanometer, der Weston'sche Spannungsmesser, das Millivoltmeter von Siemens & Halske können unter Anwendung der gehörigen Vorsicht benutzt werden.

Ist, wie vorausgesetzt wurde, der Draht überall gleichartig, so kann man das Verhältnis $\frac{w'}{w''}$ durch das Verhältnis der Drahtlängen $\frac{BA}{AD}$ ersetzen und kann dieses Verhältnis ohne weiteres auf einem Massstabe ablesen. Bei noch anderen Messbrücken macht man nur w' veränderlich, indem man durch eine verschiebbare Schneide verschiedene Drahtlängen abgrenzt, und giebt auch w'' eine bestimmte Widerstandsgrösse, z. B. 1 oder 10 ω.

Will man Widerstände messen, in welchen selbst eine EMK thätig, aber keine erhebliche Selbstinduktion vorhanden ist (Widerstand von Elementen), oder Widerstände, in welchen beim Durchgange eines Stromes durch Polarisation eine elektromotorische Gegenkraft entstehen könnte (Flüssigkeitswiderstände, Erdplatten), so ersetzt man die Batterie der Wheatstone'schen Brücke durch eine Vorrichtung, welche Wechselströme erzeugt, z. B. durch einen kleinen Induktionsapparat oder eine kleine Wechselstrommaschine und benutzt anstatt des Galvanometers ein Elektrodynamometer (vergl. Kap. VII, Abschn. 2, S. 157) oder noch bequemer ein Telephon.

Das Telephon kommt zum Schweigen, wenn das Galvanometer stromlos werden würde. Sind jedoch nicht alle Widerstände, die in Betracht kommen, ganz frei von Selbstinduktion, so gelingt es nicht, das Telephon vollkommen zum Schweigen zu bringen; alsdann sucht man die Stellung der auf dem Drahte verschiebbaren Schneide, bei der der Ton des Telephons am wenigsten laut ist.

4. Die Universalmessbrücke nach Kohlrausch[1]).

Die nebenstehende Fig. 173 zeigt die Einrichtung dieses Apparates. Bei C liegt ein kleiner Induktionsapparat, der Wechselströme liefert, wenn bei den Klemmen A und B eine aus 2 bis 3 Elementen bestehende Batterie eingeschaltet wird. Den zu messenden Widerstand legt man an die Klemmen D und E. Das Telephon legt man an die beiden rechts vorn gezeichneten Klemmen. Der unmittelbar vor A liegende Stöpsel bleibt eingesteckt. Je nach der Grösse des zu messenden Widerstandes zieht man einen der Stöpsel 1, 10, 100, 1000 ω heraus. Der unmittelbar vor A liegende Stromschlüssel wird auf den mit TEL bezeichneten Kontakt gedreht. Nunmehr verschiebt man den vorn sichtbaren Zeiger so lange hin und her, bis das Telephon zum Schweigen gebracht wird. Die Ablesung auf der unter dem Zeiger befindlichen Skala, multipliziert mit der Angabe des herausgezogenen Stöpsels, giebt unmittelbar die Grösse des zwischen D und E befindlichen Widerstandes. Hat man den Wider-

[1]) Von Hartmann & Braun in Bockenheim bei Frankfurt a. M.

stand eines Leiters zu messen, in dem merkliche Selbstinduktion vorhanden ist (Spulen, Bewickelungen von Elektromagneten), so

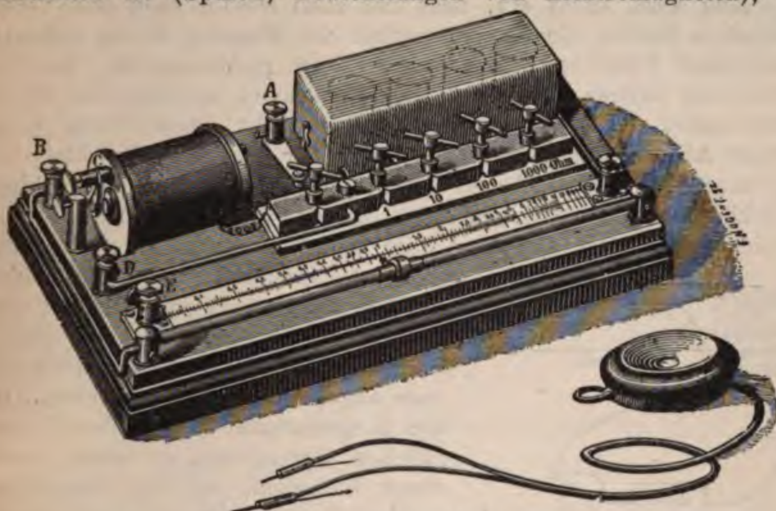


Fig. 173. Messbrücke nach F. Kohlrausch.

ersetzt man das Telephon durch das Galvanometer. Den zu messenden Widerstand legt man wieder an die Klemmen D und E. Den Stromschlüssel (der vor A liegt) dreht man auf den mit GALV bezeichneten Knopf, entfernt den davor gelegenen Stöpsel und zieht je nach der Grösse des Widerstandes einen der Stöpsel 1, 10, 100, 1000 ω.[1]) Man verschiebt den Zeiger so lange hin und her, bis das Galvanometer beim Schliessen des Stromes in Ruhe bleibt. Die Angabe des verschiebbaren Zeigers auf der Skala, multipliziert mit der Bezeichnung des herausgezogenen Stöpsels, liefert die Grösse des zu messenden Widerstandes in Ohm.

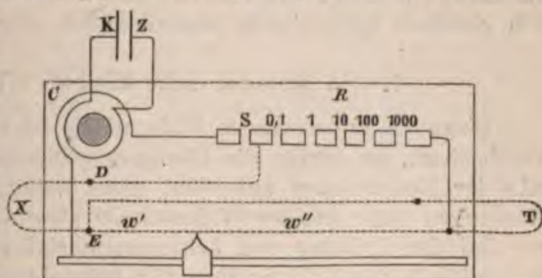


Fig. 174. Schaltung der Kohlrausch'schen Messbrücke.

Die Schaltung der Kohlrausch'schen Brücke zeigt die obenstehende Fig. 174, in der x den zu messenden Widerstand und T das Telephon bedeutet.

[1]) Man sucht es stets so einzurichten, dass der Messdraht durch den Zeiger möglichst in der Mitte geteilt wird. In dieser Lage ist der Einfluss der unvermeidlichen Einstellungsfehler am geringsten.

5. Prüfung des Messdrahtes.

Man sieht leicht ein, dass bei allen Messbrücken mit ausgespanntem Drahte die Zuverlässigkeit der Messung davon abhängt, dass dieser Draht auf seiner ganzen Länge gleichartig ist. Vor dem Kaufe der Brücke überzeugt man sich davon auf folgende Weise: Man sendet durch den ausgespannten Draht einen Strom (etwa einiger Akkumulatorenzellen), den man für längere Zeit vollständig konstant halten kann. An die beiden Seitenflächen eines rechteckigen Holzklötzchens k (vergl. Fig. 175) schraubt man zwei ebene Kupferbleche b_1 b_2, lässt dieselben über das Holz etwas vorstehen und schärft sie von aussen zu zwei Schneiden zu. Diese beiden Bleche verbindet man unter Vorschaltung eines grossen Widerstandes (etwa 1000 ω) mit den Klemmen eines empfindlichen Galvanometers. Ist der ausgespannte Draht überall von gleichem Querschnitt, so muss, wenn dieses Klötzchen, mit den Schneiden auf dem Drahte aufruhend, von einem Ende desselben zum anderen verschoben wird, der Ausschlag des Galvanometers durchaus ungeändert bleiben, weil der Spannungsabfall auf derselben Länge längs eines vom Strome durchflossenen Cylinders von gleichem Querschnitte überall gleich gross sein muss.

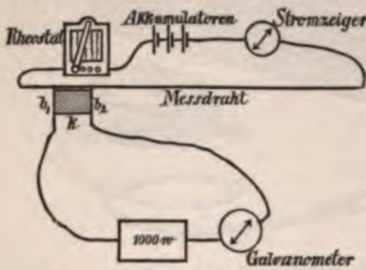


Fig. 175
Kalibrieren des Messdrahtes.

6. Die Messung sehr kleiner Widerstände.

Wenn die zu messenden Widerstände sehr klein sind (unter $^1/_{10}$ ω herabgehen), so dürfen die Übergangswiderstände, die an den Stöpseln der Messbrücken auftreten, nicht mehr vernachlässigt werden. Messungen sehr kleiner Widerstände aber kommen in der Praxis vor bei der Prüfung von Leitungsmaterialien, bei Bestimmung der Widerstände von Kohlenstäben für Beleuchtungszwecke, und bei der Ermittelung von Ankerwiderständen grösserer Dynamomaschinen. Man verwendet dann eine Methode, die zuerst W. Thomson angegeben hat, bei der die veränderlichen Kontaktwiderstände ohne Einfluss bleiben.

Der Stab, dessen Widerstand gemessen werden soll, wird durch zwei Paar Messingkeile h k und l i gehalten. (Vergl. Fig. 176.) Das eine Paar ist fest; das andere bewegt sich längs einer Teilung, die gestattet, die Länge des eingeschalteten Stückes abzulesen. Auf einem dicken Neusilberdraht, der ebenfalls über einer Skala ausgespannt ist, sind zwei verschiebbare Ableitungen c c_1 beweglich.

Der zu messende Stab und dieser Neusilberdraht werden nun von einem kräftigen Strome (5 bis 20 A) durchflossen, den eine Akkumulatorenbatterie B liefert. Im Nebenschlusse zu diesem Stromkreise liegen zwei Widerstandskasten p o und m n, zwischen denen

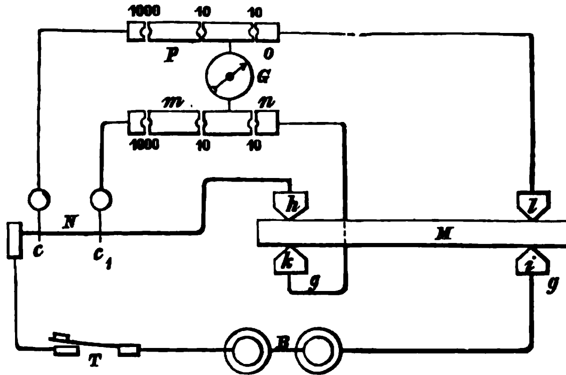


Fig. 176. Messbrücke für sehr kleine Widerstände.

ein empfindliches Galvanometer G eingeschaltet ist. Die Widerstände an diesen Rheostaten werden so geschaltet, dass das Verhältnis besteht:

$$m : n = p : o \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

Man verschiebt nun die Gleitkontakte so lange, bis das Galvanometer auf Null zeigt. Bezeichnet man den zu messenden Widerstand mit x, den bekannten Widerstand des Neusilberdrahtes mit r, die elektrischen Potentiale (Spannungen) an den Punkten c, c_1, k, l mit V_p, V_m, V_n, V_o, und mit V das Potential an den beiden Klemmen des Galvanometers, nennt man endlich J den Strom, der M und N durchfliesst, i_1 den Strom, der den Zweig c p o l und i_2 den Strom, der den Zweig c_1 m n k durchfliesst, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze:

$$J = \frac{1}{r}(V_p - V_m) = \frac{1}{x}(V_n - V_o),$$

oder

$$\frac{x}{r} = \frac{V_n - V_o}{V_p - V_m} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4)$$

$$i_1 = \frac{1}{p}(V_p - V) = \frac{1}{o}(V - V_o),$$

oder

$$\frac{o}{p} = \frac{V - V_o}{V_p - V} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 5)$$

$$i_2 = \frac{1}{m}(V_m - V) = \frac{1}{n}(V - V_n),$$

oder

$$\frac{n}{m} = \frac{V - V_n}{V_m - V} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 6)$$

Setzt man nach Gleich. 3) die rechten Seiten der Gleich. 5) **und** 6) gleich und multipliziert die Nenner weg, so findet man leicht,[1]) **dass**:

$$\frac{V_p - V_m}{V_n - V_o} = \frac{V_p - V}{V - V_o}$$

und somit:

$$\frac{r}{x} = \frac{p}{o} = \frac{m}{n} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

ist.

Aus dieser Gleich. 7) kann nunmehr x leicht ermittelt werden. Die Übergangswiderstände addieren sich in diesem Falle zu den Widerständen m, n, o, p, in Vergleich zu welchen sie ohne Fehler vernachlässigt werden können.

Siemens & Halske und viele andere Firmen haben Messapparate für kleine Widerstände konstruiert, die auf dieser Methode beruhen.

7. Methode der direkten Ausschlags. Messung von Isolationswiderständen.

Sehr häufig tritt in der praktischen Elektrotechnik die Notwendigkeit hervor den Grad der Isolation von Leitungsmaterialien zu bestimmen, die mit passenden Umhüllungen aus Gespinsten oder aus Kautschuk oder Guttapercha versehen sind, oder zu messen, welche Isolation eine fertige Leitungsanlage mit zahlreichen Verzweigungen besitzt.

Um die Isolation eines Kabels zu messen, taucht man dasselbe in ein Gefäss mit Wasser und lässt nur die sorgfältig trocken gehaltenen Enden herausragen.[2]) Ein Ende des in der isolierenden Hülle befindlichen Leiters verbindet man mit einem sehr empfindlichen Galvanometer; die andere Klemme des Galvanometers wird mit einer aus vielen Elementen bestehenden Batterie verbunden, deren anderer Pol mit dem Wasser in leitender Verbindung steht.

Da es eine absolute Isolation überhaupt nicht giebt, wird stets ein Strom von der Stärke i entstehen, und das Galvanometer (dessen Konstante k sein mag) wird einen Ausschlag α zeigen. Dann ist:

$$i = \frac{E}{r + g + x} = k \cdot \alpha \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

wenn E die EMK der Batterie, r der Widerstand der Batterie, g der des Galvanometers und x der Isolationswiderstand ist.

---

[1]) Indem man beiderseitig — $V^2 - V_p \cdot V_o + V \cdot V_o + V_p \cdot V$ subtrahiert.

[2]) Bei Leitungsmaterialien, die man nicht in einem Wasserbade prüfen kann, presst man ein längeres Stück zwischen zwei Metallplatten, die man mit der Batterie verbindet.

Da der Ausschlag bei sehr ausgedehnten Leitungen wegen der Ladungsvorgänge nicht immer sofort eintritt, muss man warten, bis α einen unveränderlichen Wert angenommen hat.

Bei einem zweiten Versuche ersetzt man das Kabel durch einen sehr hohen Widerstand R von bekannter Grösse und bringt, wenn nötig, vor den beiden Klemmen des Galvanometers noch einen Nebenschluss vom Widerstande s an, damit der Ausschlag des Magneten nicht zu gross wird.

Durch das Galvanometer fliesst dann nur ein Strom i', während durch R ein Strom J fliesst. Der Ausschlag sei α', dann ist

$$i' = K \cdot \alpha' = J \cdot \frac{s}{g + s} \text{ und } J = \frac{E}{r + \frac{g \cdot s}{g + s} + R} \quad . \quad . \quad 9)$$

Daraus folgt

$$x = \frac{g + s}{s} \cdot \left(\frac{g\,s}{g + s} + r + R\right) \frac{\alpha}{\alpha'} \cdot - (r + g) \quad . \quad . \quad 10)$$

Man erkennt leicht, dass man mit geringen Abänderungen dieses Verfahren auch benutzen kann, um Isolationsmaterialien auf ihre Leitungsfähigkeit zu prüfen.

Ebenso kann man, zumal wenn man das Torsionsgalvanometer oder das Präzisions-Volt- und Ampèremeter von Siemens & Halske als Strommesser benutzt, auf dieselbe Weise auch den Isolationszustand der Leitungen fertiger elektrischer Beleuchtungs- und Kraftübertragungs-Anlagen bestimmen.

Man löst zu dem Zwecke die Leitungen von allen Beleuchtungskörpern,[1]) Elektromotoren, galvanoplastischen Bädern etc., isoliert die sonst zur Stromzuführung dienenden Kabelenden, schliesst alle Ausschalter und prüft nun (am besten mit einer Akkumulatorenbatterie oder unter Benutzung der sonst als Stromquelle dienenden Maschine) bei derselben Spannung, mit der die Anlage für gewöhnlich betrieben wird. Der eine Pol der Stromquelle wird leitend mit der Erde verbunden. Vom anderen Pol aus führt man eine Leitung nach dem Galvanometer, von da zu einem Vorschaltwiderstande, weiter zu der Hin- oder Rückleitung.

Hat man nun unter Benutzung eines Vorschaltwiderstandes w den Ausschlag φ erzielt, so ist die Stromstärke i

$$i = \frac{E}{r + g + w + x} = k \cdot \varphi.$$

Hier bezeichnet wieder E die Klemmenspannung der Stromquelle, r ihren inneren Widerstand, g den Widerstand des Galvanometers.

[1]) Die Glühlampen werden einfach aus den Fassungen herausgeschraubt.

Dann löst man die Verbindung mit der zu prüfenden Leitung und legt diesen Draht an die zur Erde führende Leitung. Erhält man nun unter Benutzung eines anderen Vorschaltwiderstandes W einen anderen Ausschlag φ' am Galvanometer, der einer Stromstärke i' entspricht, so ist:

$$i' = \frac{E}{r + g + W} = k \cdot \varphi'.$$

Aus diesen beiden Gleichungen findet man:

$$x = (r + g + W) \cdot \frac{\varphi'}{\varphi} - (r + g + w) \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

Da der innere Widerstand der Stromquelle im Verhältnis zu W und w meist sehr klein ist, kann r in fast allen Fällen ohne merklichen Fehler vernachlässigt werden.

8. Messungen mit dem Isolationsprüfer.

Um bei der Abnahme elektrischer Anlagen den Isolationszustand zu prüfen, benutzt man zur Anwendung der eben beschriebenen Methode besonders für diesen Zweck hergestellte Instrumente. Es sind dies nach dem Prinzip der d'Arsonval-Galvanometer gebaute, sehr empfindliche Präzisionsspannungsmesser (vgl. Kap. XI, Abschn. 4,



Fig. 177. Isolationsmesser von Siemens & Halske.

S. 206) mit besonders hohem inneren Widerstande (30000 Ω). Diesen Instrumenten ist oft ausser der Spannungsskala für eine bestimmte

Spannung (220 V, 110 V oder 65 V) eine Widerstandsskala beigegeben, an der man ohne weiteres den Widerstand in Ohm ablesen kann. Ausserdem wird jedem Instrumente eine Tabelle beigefügt, aus der für die mit dem Apparate selbst ermittelte Spannung der Hilfsbatterie oder der Stromquelle der mit Hilfe des Apparates durch eine Spannungsmessung bestimmte Widerstand ermittelt werden kann.

Will man den Isolationszustand einer fertigen Anlage prüfen, so kann man die Untersuchung entweder mit Benutzung einer Hilfsbatterie durchführen, deren Spannung der Betriebsspannung der Anlage möglichst gleichkommt, oder man misst den Isolationszustand während die Anlage in Betrieb ist.

Die Abbildung Fig. 177 zeigt z. B. den Isolationsmesser von Siemens & Halske, dessen innerer Widerstand 30000 Ω beträgt. Aus Fig. 178 kann die Schaltung ersehen werden, deren man sich bedient, wenn man unter Benutzung einer Hilfsbatterie arbeitet.

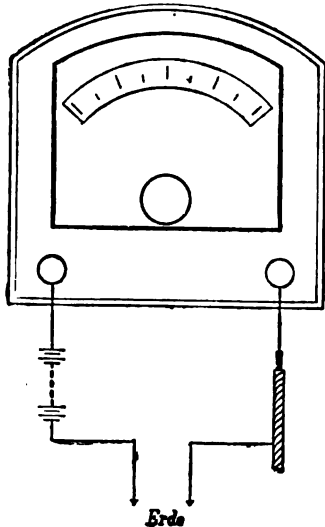


Fig. 178. Schaltung bei Isolationsmessung mit Hilfsbatterie.

Beobachtet man am Instrument die Spannung der Batterie gleich s, und nach Anwendung der in Fig. 178 angegebenen Schaltung den Ausschlag P und ist w der innere Widerstand des Spannungsmessers oder des Isolationsprüfers, so ist der Isolationswiderstand F

$$F = w\left(\frac{s}{P} - 1\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Will man die Anlage im Betriebe messen,[1] so misst man zunächst

a) bei Zweileiteranlagen

die Betriebsspannung (Spannung zwischen + und — Schiene am Schaltbrett), diese sei Δ. Hierauf misst man die Spannung zwischen der + Schiene und der Erde, diese sei P_+, und die Spannung P_-,

[1]) Ausführliche Anleitung zu Isolationsmessungen findet man in den Schriften: Frölich, Isolations- und Fehlerbestimmungen an elektrischen Anlagen, Knapp, Halle 1895, und bei Raphael-Apt, Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen an elektrischen Starkstromleitungen, Berlin-München, Springer-Oldenbourg 1900. Vergl. auch: Skutsch, ETZ, XVIII, 1897, S. 142.

die zwischen der — Schiene und der Erde herrscht. Der Isolationswiderstand F gegen Ende ist alsdann[1]):

$$F = w\left(\frac{\Delta}{P_+ - P_-} - 1\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

[1]) Die Gleichung 13) ergiebt sich auf folgende Weise.

Bezeichnet $\triangle$ die Betriebsspannung, P_+' und P_-' die Spannungen der positiven und der negativen Schiene gegen Erde, ist ferner f_1 der Widerstand, der zwischen der positiven Leitung und der Erde, und f_2 der Widerstand, der zwischen der negativen Leitung und der Erde vorhanden ist, und wird f_1 von einem Fehlerstrome i_1, und f_2 von einem Fehlerstrome i_2 durchflossen, so gelten nach den Kirchhoff'schen Sätzen (vergl. Kap. I, Abschn. 19 u. 20, S. 18), wie Fig. 179 zeigt, folgende Gleichungen:

$$i_1 + i_2 = o \qquad i_1 \cdot f_1 - i_2 \cdot f_2 = \triangle.$$

Durch Elimination von i_1 findet man:

$$i_2 = -\frac{\triangle}{f_1 + f_2}.$$

Nun ist nach dem Ohm'schen Gesetze:

$$P_-' = i_2 \cdot f_2 = -\triangle \cdot \frac{f_2}{f_1 + f_2} = -\triangle \cdot \frac{\frac{1}{f_1}}{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}}.$$

Die Grösse $\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$, die Summe der Leitfähigkeiten der Isolationsfehler, wird mit $\frac{1}{F}$ bezeichnet und heisst Leitfähigkeit der gesamten Fehlerleitung. Die Grösse F selbst heisst Isolationswiderstand des Systems.

Unter Benutzung der Grösse F kann man daher schreiben:

$$P_-' = -\triangle \cdot \frac{\frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F}} \text{ und entsprechend: } P_+' = +\triangle \cdot \frac{\frac{1}{f_2}}{\frac{1}{F}}.$$

Wird nun ein Voltmeter mit dem Widerstande w zwischen den positiven Pol und die Erde geschaltet, d. h. schaltet man den Voltmeterwiderstand zum Fehlerwiderstand f_1 parallel, so ist nunmehr für die Leitfähigkeit $\frac{1}{f_1}$ die Summe der Leitfähigkeiten $\frac{1}{f_1} + \frac{1}{w}$ einzusetzen, und man erhält die am Voltmeter beobachteten, etwas veränderten Spannungen P_+ und P_-:

$$P_+ = \frac{\triangle \cdot \frac{1}{f_2}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{w}}$$

und entsprechend, wenn man das Voltmeter zwischen den negativen Pol und die Erde legt:

$$P_- = -\frac{\triangle \cdot \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{w}}.$$

b) bei Dreileiteranlagen

at man drei Schienen (+ Schiene, 0 Schiene, — Schiene). Man nacht alsdann zwischen je zwei benachbarten Schienen (+ und 0 der 0 und —) dieselben Beobachtungen, wie bei Messungen am Zweileitersystem. Der Isolationswiderstand der positiven Hälfte des Dreileitersystems ist alsdann z. B.:

$$F = w\left(\frac{\Delta}{P_{+} - P_{0}} - 1\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

Die Spannungen zwischen den Schienen und Erde sind dann von gleichem Vorzeichen, wenn der Ausschlag des Instrumentes nach derselben Seite erfolgt, sofern ein und dieselbe Klemme des Apparates mit den beiden Schienen verbunden wird. Ist dies nicht der Fall, muss man, um messen zu können, die Erd- und Schienenklemme vertauschen, so ist das betreffende P mit entgegengesetztem Vorzeichen in die Rechnung einzuführen.

Man erhält auf diese Weise die Isolation der ganzen Anlage gegen Erde.

9. Bestimmung des Isolationszustandes einer nicht unter Spannung stehenden Leiteranlage.

Bei Ermittelung des Isolationszustandes eines durch zwei Zuleitungen gespeisten Hausleitungsnetzes handelt es sich um die Bestimmung des Widerstandes y zwischen Plusleitung und Erde, des Widerstandes z zwischen Minusleitung und Erde und des Widerstandes x zwischen Plusleitung und Minusleitung. Wäre die Anlage ideal vollkommen, so müssten diese drei Grössen unendlich gross sein, in Wirklichkeit haben sie bei gut ausgeführten Anlagen meist einen grossen aber endlichen Wert.

Subtrahiert man die beiden Gleichungen, so erhält man:

$$P_{+} - P_{-} = \triangle \cdot \frac{\frac{1}{F}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{n}}$$

oder:

$$1 + \frac{F}{n} = \frac{\triangle}{P_{+} - P_{-}}$$

und daraus die obige Gleichung 13)

$$F = w \cdot \left(\frac{\triangle}{P_{+} - P_{-}} - 1\right).$$

Fig. 179 erläutert dies in schematischer Weise, während Fig. 179 die Anordnung im Querschnitt darstellt.

Da man den Sitz der Widerstände x, y, z nicht kennt, dieselben auch nicht von den Leitungen lostrennen kann, bleibt nichts anderes übrig, als drei Widerstandsmessungen nach einer der vorher angegebenen Methoden auszuführen. Man misst den Widerstand zwischen N und P gleich a, den Widerstand zwischen P und E gleich b und den Widerstand zwischen N und E gleich c.

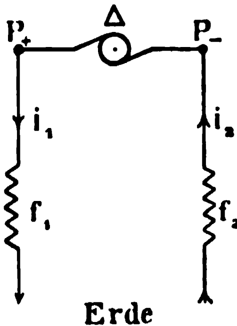


Fig. 179.

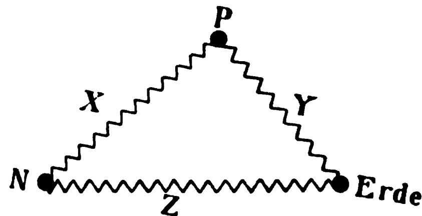


Fig. 180.

Jeder dieser drei Widerstände setzt sich, wie Fig. 180 zeigt, aus zwei parallel geschalteten Widerständen zusammen. (Vergl. Kap. I, Abschn. 20, S. 21.)

a ist der Gesamtwiderstand der parallel geschalteten Widerstände x und y + z, daher ist: $\frac{1}{a} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y+z}$

b ist der Gesamtwiderstand der parallel geschalteten Widerstände y und x + z, daher ist: $\frac{1}{b} = \frac{1}{y} + \frac{1}{x+z}$

c ist der Gesamtwiderstand der parallel geschalteten Widerstände z und x + y, daher ist: $\frac{1}{c} = \frac{1}{z} + \frac{1}{x+y}$.

Daraus ergeben sich die drei Gleichungen:

$$\frac{x(y+z)}{x+y+z} = a \qquad \frac{y(x+z)}{x+y+z} = b \qquad \frac{z(x+y)}{x+y+z} = c \quad . \qquad 15)$$

oder wenn man $x + y + z = m$ setzt:

$$xy + xz = a \cdot m \qquad yz + xy = b \cdot m \qquad xz + yz = c \cdot m.$$

Durch Addition je zweier dieser Gleichungen und Subtraktion der dritten erhält man:

$$2xy = (a + b - c) \cdot m, \qquad 2yz = (b + c - a) \cdot m,$$
$$2xz = (a - b + c) \cdot m.$$

Durch Division je zweier Gleichungen erhält man:

$$z = \frac{-a+b+c}{a+b-c} \cdot x \text{ und } y = \frac{-a+b+c}{a-b+c} \cdot x \text{ u. s. f.,}$$

und durch Einsetzung in je eine der ersten Gleichungen:

$$\left.\begin{aligned} x &= a + \frac{(a+b-c)\,(a-b+c)}{2\,(-a+b+c)} \\ y &= b + \frac{(a-b+c)\,(-a+b+c)}{2\,(a-b+c)} \\ z &= c + \frac{(-a+b+c)\,(a-b+c)}{2\,(a+b-c)} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

Setzen wir zur Vereinfachung

$$s = \frac{1}{2}\,(a+b+c)\,. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 17)$$

so nehmen die drei Gleichungen, aus welchen man die numerischen Werte von x, y und z leicht berechnen kann, die einfache Gestalt an:

$$\left.\begin{aligned} x = a + \frac{(s-b)\,(s-c)}{s-a},\ y = b + \frac{(s-a)\,(s-c)}{s-b} \\ z = c + \frac{(s-a)\,(s-b)}{s-c} \end{aligned}\right\} . \quad 18)$$

Da die Isolationswiderstände erfahrungsmässig mit wachsender Spannung abnehmen, misst man unter Anwendung einer Elektrizitätsquelle, die thunlichst die Betriebsspannung der Anlage giebt, benutzt also eine Messbatterie oder die Stromquelle der Anlage. Besonders für solche Messungen sind die Isolationsprüfer sehr geeignet.

Findet man, dass einer der Isolationswiderstände x, y oder z unzulässig klein ist, so zerlegt man durch Lösung der Anschlüsse die Anlage in zwei Teile und wiederholt für jeden Teil die Untersuchung.

Man verfährt mit dem Teil, in dem sich der Fehler befindet, in derselben Weise, bis man den mangelhaft isolierten Leiterteil gefunden hat. Diesen ersetzt man alsdann, oder beseitigt den Isolationsfehler.

Bei Dreileiteranlagen behandelt man die beiden Hälften in derselben Weise, und hierauf die beiden Aussenleiter, als ob der Mittelleiter nicht vorhanden wäre.

10. Messung des inneren Widerstandes galvanischer Batterien.

Will man den inneren Widerstand einer Batterie hintereinander geschalteter Elemente, z. B. einer Akkumulatorenbatterie, messen, so teilt man die Batterie in zwei gleiche Teile, die man gegeneinander schaltet. Dann misst man den Widerstand mit der Kohlrausch'schen Telephonbrücke, unter Benutzung des Wechselstromes des Induk-

toriums. Da der wegen ungleicher Beschaffenheit der beiden Hälften der Batterie etwa noch entstehende stetige Strom die Messung durch das Telephon nicht beeinträchtigt, kann man den inneren Widerstand der Batterie nunmehr auf gewöhnliche Weise bestimmen.

Grosse Genauigkeit kann in solchen Fällen überhaupt nicht erreicht werden, da der innere Widerstand der galvanischen Elemente und der Akkumulatorenzellen in geringem Masse von der Stärke und auch von der Dauer des Stromes abhängig ist, der während der Messung durch die Zellen hindurchfliesst.

Eine andere Methode, die auch für näherungsweise Bestimmungen geeignet erscheint, ist die folgende:

Man sendet von der Batterie, deren inneren Widerstand w_i man bestimmen will, einen Strom durch einen geeigneten Widerstand und misst die Stromstärke i durch ein in diesen Widerstand eingeschaltetes Ampèremeter; gleichzeitig beobachtet man die Klemmenspannung e durch ein Voltmeter von sehr hohem Widerstande. Hierauf unterbricht man den Strom und misst die EMK an den Polen der offenen Batterie; diese sei E. Dann ist (nach Kap. I, Abschn. 16, Gleich. 10, S. 16) der innere Widerstand der Batterie:

$$w_i = \frac{E - e}{i} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 19)$$

Will man nach dieser Methode genaue Messungen anstellen, so muss man die Klemmenspannung und die EMK mit dem Elektrometer (vergl. Kap. XI, Abschn. 1, S. 200) messen.

Für die Bedürfnisse des praktischen Elektrotechnikers aber genügt es, sich in solchen Fällen des Torsionsgalvanometers zu bedienen; unter Umständen kann man dem Galvanometer noch einen hohen Widerstand von bekannter, passender Grösse vorschalten. (Vergl. Kap. XI, Abschn. 3, S. 204.)

11. Messung von Widerständen mit dem Kompensator.

Wir wollen zum Schluss auch die indirekte Methode nicht unerwähnt lassen, deren man sich bedienen kann, um Widerstände zu bestimmen.

Man misst die Stromstärke i, die man durch einen Widerstand sendet, und bestimmt den Spannungsunterschied e an den Enden des Widerstandes mit einem genauen Spannungsmesser von sehr hohem Widerstande, alsdann ist:

$$w = \frac{e}{i} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

Besonders der in Kapitel XI, Abschn. 6, S. 214 beschriebene Kompensator ist für die Anwendung dieses Verfahrens geeignet.

XIV. Kapitel.

Messung der Lichtstärke und Helligkeit.

1. Die Grundlehren der Lichtmessung. Photometrische Einheiten.

Wenn eine punktförmige, nach allen Richtungen hin gleich beschaffene Lichtquelle den Lichtstrom Φ aussendet und eine Kugelfläche vom Radius R, deren Mittelpunkt in der Lichtquelle liegt, alle diese Strahlen auffängt, so ist die **Helligkeit** e der **Beleuchtung** der Fläche, d. h. die Lichtmenge, welche die Flächeneinheit empfängt:

$$e = \frac{\Phi}{4 R^2 \pi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Die Grösse:

$$\frac{\Phi}{4\pi} = J$$

heisst die **Lichtstärke** der Lichtquelle. Als Einheit der Lichtstärke dient die Hefnerlampe (in horizontaler Richtung); diese Einheit führt den Namen **Kerze**.[1])

Die Helligkeit e' der Beleuchtung einer zweiten konzentrischen Hohlkugel vom Radius R' ist entsprechend:

$$e' = \frac{\Phi}{4 R'^2 \cdot \pi}, \text{ und somit: } \frac{e}{e'} = \frac{R'^2}{R^2}.$$

Eine kleine Fläche von der Grösse f, die sich im Abstande r von der Lichtquelle, deren Intensität J ist, befindet, empfängt eine Lichtmenge, einen **Lichtstrom** q:

$$q = \frac{J \cdot f}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Die von einer punktförmigen Lichtquelle erzeugte Helligkeit der Beleuchtung ist somit umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung.

Der gesamte von dieser Lichtquelle ausgesendete Lichtstrom Φ ist:

$$\Phi = \frac{J\, 4 \pi r^2}{r^2} = 4 \pi J \quad \ldots\ldots \quad 3)$$

---

[1]) Die neuen photometrischen Einheiten sind auf dem Internationalen Elektrotechniker-Kongress in Genf im Jahre 1896 festgesetzt worden.

Die Einheit des Lichtstromes ist der Strom, der in einem Körperwinkel von der Grösse 1 von einer punktförmigen Lichtquelle von der Intensität einer Hefner-Einheit ausgesendet wird. Diese Einheit heisst Lumen (abgekürzt Lm).

Die Beleuchtung E eines Punktes eines Flächenstückes ist:

$$E = \frac{J}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

Die Einheit der Beleuchtung heisst Lux (abgekürzt Lx).

Schliesst eine Fläche von der Grösse f mit der Richtung der einfallenden Strahlen einen Winkel α ein, so empfängt sie nur die Lichtmenge q_1

$$q_1 = \frac{J \cdot f}{r^2} \cdot \sin \alpha \quad \ldots \ldots \ldots \quad 5)$$

Ist die Lichtquelle nicht punktförmig, sondern wird die Lichtmenge J von einer Fläche von dem Inhalte s ausgesendet, so nennt man den Quotienten $\frac{J}{s}$ den Glanz der Lichtquelle oder die Erhellung. Die Einheit der Flächenhelligkeit ist 1 Hefner-Einheit für 1 *qcm*.

Unter einem Neigungswinkel β gegen die Normale auf die ausstrahlende Fläche sendet die Flächeneinheit der Lichtquelle eine Lichtmenge $\frac{Q}{s} \cdot \cos \beta$ aus.

Das Produkt aus Beleuchtung und Zeitdauer derselben heisst Belichtung; ihre Einheit ist die Lux-Sekunde.

Unter Lichtleistung, deren Einheit die Lumen-Sekunde oder Lumen-Stunde bildet, versteht man das Produkt aus Lichtstrom Φ mal der Zeit t.

2. Die Messung der Lichtintensität.

Die Messung der Lichtintensität, die Photometrie, hat den Zweck, zu bestimmen, wievielfach heller die zu messende Lichtquelle als eine als Masseinheit dienende Lichtquelle ist. Zur Ermittelung dieses Verhältnisses kann nur die Stärke des Lichteindruckes auf die Netzhaut unseres Auges verwendet werden. Am zuverlässigsten urteilt unser Auge, wenn die Helligkeit ungefähr der des zerstreuten Tageslichtes gleichkommt. Streng genommen können nur Lichtquellen von genau gleicher Farbe miteinander verglichen werden. In der elektrotechnischen Praxis lässt man die Farbenunterschiede jedoch zumeist unberücksichtigt; dadurch wird allerdings die Genauigkeit

photometrischer Messungen ausserordentlich beeinträchtigt.[1]) Bei Helligkeitsmessungen an Bogenlampen hilft man sich damit, dass man zunächst das Bogenlicht mit einem Petroleum- oder Gas-Intensivbrenner, und dann dieses Zwischenlicht mit der Lichteinheit vergleicht. Mit 3 % Unsicherheit muss sich der Anfänger bei photometrischen Arbeiten zufrieden geben; geübte Beobachter kommen mit den besten Instrumenten bis auf 1 %.

In den meisten Instrumenten vergleicht man die Helligkeiten zweier Flächen, die man gleichzeitig durch ein Auge beobachtet. Die eine Fläche wird durch die eine, die andere durch die andere der zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet, und man wählt die Entfernungen beider Lichtquellen so, dass beide Flächen gleich hell erscheinen. Die Lichtstärken sind dann den Quadraten ihrer Entfernung von den beleuchteten Flächen direkt proportional. Selbstverständlich muss man dafür Sorge tragen, dass die Flächen von beiden Lichtquellen unter gleichen Winkeln bestrahlt und unter gleichen Winkeln vom Beobachter gleichzeitig betrachtet werden.

Räumlich ausgedehnte Lichtquellen können ohne merklichen Fehler als punktförmig betrachtet werden, wenn ihre Entfernung von dem Schirme mehr als das Zehnfache ihrer grössten Ausdehnung beträgt.

3. Die Einheit der Lichtstärke.

Als Einheit der Lichtstärke dient nach einem vom Pariser elektrotechnischen Kongress angenommenen Vorschlage Violle's die Lichtmenge, welche 1 *qcm* der Oberfläche flüssigen Platins in normaler Richtung bei der Erstarrungstemperatur (1775° C.) aussendet.

Da diese Einheit nur äusserst schwierig herzustellen ist, so hat Werner v. Siemens eine einfache Vorrichtung konstruiert, bei der ein Streifen sehr dünnen Platinbleches durch einen starken Strom geschmolzen wird. Vor diesem Streifen befindet sich eine undurchsichtige Wand, die eine Öffnung von 0,1 *qcm* Inhalt besitzt. Im Augenblicke des Abschmelzens sendet diese Vorrichtung somit ein Zehntel der Violle'schen Lichteinheit aus. Leider lässt sich auch auf diese Weise die Violle'sche Lichteinheit nur sehr ungenau reproduzieren.

Als sehr konstant und jederzeit und überall leicht anwendbar hat sich die Amylacetatlampe von v. Hefner-Alteneck erwiesen, die jetzt allgemein als praktische Lichteinheit verwendet wird.

---

[1]) Crova hat bemerkt, dass das Verhältnis des Lichteindruckes zweier Lichtquellen ungefähr dem Verhältnis der Strahlen entspricht, welche eine Wellenlänge von 0,000582 *mm* besitzen. Um nur diese Strahlen zu vergleichen, beobachtet man durch ein planparalleles Glasgefäss von 5 *mm* lichter Weite, welches mit einer mit Chlorgas übersättigten Lösung von 22,321 *g* Eisenchlorid und 27,191 *g* Nickelchlorür in 100 *g* Wasser gefüllt ist.

Aus dem horizontalen Querschnitte eines mit chemisch reinem Amylacetat (Siedepunkt 138° C.) gesättigten Dochtes, der vollständig ein 25 *mm* langes Neusilberröhrchen von 8 *mm* lichter Weite und 8,3 *mm* äusserem Durchmesser ausfüllt, erhebt sich eine Flamme von 40 *mm* Höhe.[1]) Die Lampe soll in reiner, ruhiger Luft brennen und mit den Messungen erst 10 Minuten nach dem Anzünden begonnen werden. (Vergl. nebenstehende Fig. 181.) Diese Amylacetatlampen können, auch mit einem optischen Flammenmasse versehen, von Siemens & Halske in Berlin bezogen werden. (Vergl. Fig. 182.)

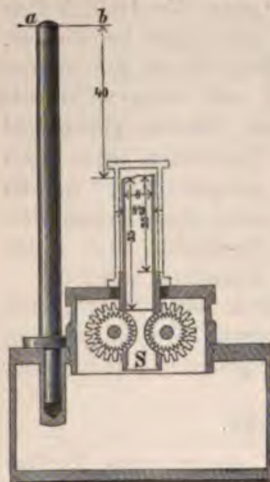


Fig. 181. Einrichtung der Hefner'schen Amylacetatlampe.

Die Abbildung Fig. 182 stellt die Hefner-Lampe mit all ihren Ausrüstungsgegenständen, Hefner'schem und Krüss'schem Flammenmass, dar.

Da die Hefner-Lampe seit dem Elektrikerkongress in Genf (1896) als internationales technisches Mass der Lichtintensität anerkannt worden ist, hat die Deutsche Physikalisch-Technische Reichsanstalt auch die Abhängigkeit der Intensität von Luftdruck, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit genau untersucht. Die umstehenden Diagramme Fig. 183 und Fig. 184 stellen diese Abhängigkeiten graphisch dar.

Das Verhältnis der Hefner'schen zu den übrigen auch gelegentlich als Mass verwendeten Lichteinheiten ergiebt nachstehende Tabelle:[2])

Einheit	Hefner-Kerzen	Vereins-Paraffin-Kerzen	Bougies décimales	Carcels	Englische Normal-Kerzen
1 Hefner-Kerze (HK) = . .	1	0,83	0,885	0,092	0,88
1 Vereins-Paraffin-Kerze =	1,2	1	1,06	0,11	1,05
1 Bougie décimale = ...	1,13	0,94	1	0,104	0,99
1 Carcel = ...	10,9	9,1	9,6	1	9,5
1 englische Normal-Kerze =	1,14	0,95	1,01	0,105	1

[1]) Bei einer Flammenhöhe l zwischen 40 und 60 *mm* ist die Leuchtkraft: $1 + 0{,}025\ (l - 40)$; unter 40 *mm* Flammenhöhe beträgt die Leuchtkraft: $1 - 0{,}03\ (l - 40)$.

[2]) Die Werte, die Laporte auf Grund der französischen Messungen in Bulletin de la Société International des Electriciens, Bd. XV, S. 181, giebt, weichen nur unwesentlich von diesen Zahlen ab, z. B. 1 bougie déc = 0,104 carcel, 1 HE = 0,093 carcel.

Die einzige Einwendung, die man mit Recht gegen die Amylacetatlampe gelegentlich erhoben hat, ist die, dass ihr Licht ziemlich stark rot gefärbt und der unmittelbare Vergleich mit dem hellgelben



Fig. 182. Hefnerlampe mit Hefner'schem und Krüss'schem Flammenmass.

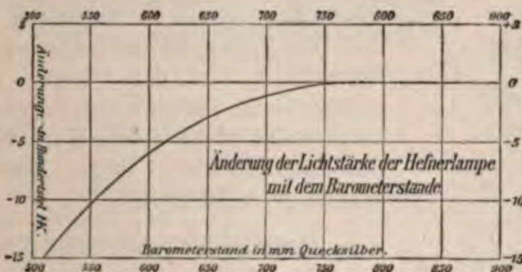


Fig. 183.



Fig. 184.

Lichte [1]) von Bogenlampen daher etwas schwierig ist. Derselbe Einwand trifft aber auch die Normal-Kerzen, die früher als Lichteinheit verwendet wurden, obgleich längst bekannt war, dass deren Leuchtkraft sehr grossen Schwankungen unterworfen war.

[1]) Wenn man Bogenlicht mit weissem Tageslicht vergleicht, erkennt man deutlich, dass ersteres ausgesprochen gelb ist.

4. Das Schattenphotometer von Lambert (Rumford).

Vor einem mattweissen Schirme S wird ein undurchsichtiger Stab s aufgestellt (Fig. 185). Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen A und B werden vor diesen Schirm gestellt, sodass die beiden entstehenden Schatten A′ und B′ sich gerade berühren und die Einfallswinkel der Strahlen möglichst gleich sind. Man entfernt beide Lichtquellen so lange, bis beide Schatten genau gleich dunkel erscheinen. Jeder der beiden Schatten empfängt dann nur Licht von einer der beiden Lichtquellen, da die andere für ihn verdeckt ist. Die zu vergleichenden Lichtstärken sind ohne weiteres den Quadraten der Entfernung proportional:



Fig. 185.
Schattenphotometer.

$$J_A : J_B = \overline{AA'}^2 : \overline{BB'}^2 .$$

Der Vorzug dieses Apparates ist seine Einfachheit und der Umstand, dass eine gleichmässige Beleuchtung durch eine fremde Lichtquelle nicht sonderlich störend wirkt. Die Empfindlichkeit dieser Messmethode ist allerdings nicht gross.

5. Dispersionsphotometer von Ayrton.

Für Messungen an Bogenlampen hat Ayrton den einfachen Lambert'schen Apparat etwas umgestaltet und ihm den Namen Dispersionsphotometer gegeben. Da man nämlich nur selten genügend grosse Räume zur Verfügung hat, wie sie für Messungen an Bogenlampen erforderlich sein würden, lässt Ayrton die Strahlen der Bogenlampe durch eine Zerstreuungslinse L hindurchgehen, die sich in einem beweglichen undurchsichtigen Schirme befindet (vergl. Fig. 186). Da Bogenlampen in verschiedenen Richtungen gegen die Achse der Kohlenstäbe sehr verschiedene Leuchtkraft besitzen und man nur schwierig mit geneigtem Photometer arbeiten kann, so hängt man die Lampe so auf, dass ihre Strahlen unter demjenigen Winkel, unter dem die Leuchtkraft gemessen werden soll, auf den unter 45° gegen die Achse geneigten, ebenen Spiegel M fallen. An einem mit dem Spiegel verbundenen Teilkreis mit Zeiger D kann man den Winkel ablesen, den die Strahlen der Bogenlampe mit der horizontalen Richtung einschliessen. Die Bogenlampe wird so aufgehängt, dass sie in einer zur Drehachse des Spiegels normalen

Ebene auf einem Kreise beweglich ist, dessen Mittelpunkt in M liegt. Vertikal über dem Spiegel M (vergl. Fig. 187) befindet sich der Drehpunkt R eines beweglichen Armes RR_1, an dessen Ende R_1 an einer Schnur von der Länge R_1B die zu photometrierende Bogen-

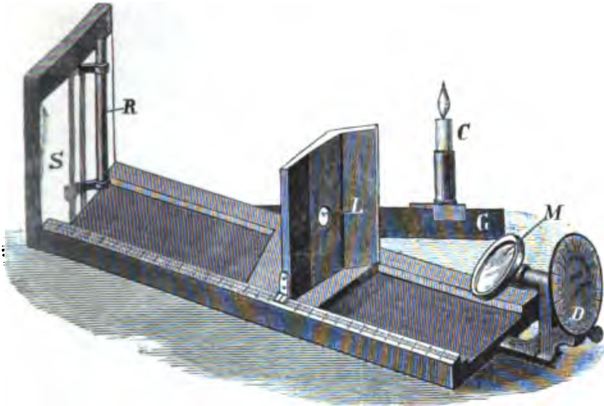


Fig. 186.
Ayrtons Dispersionsphotometer.

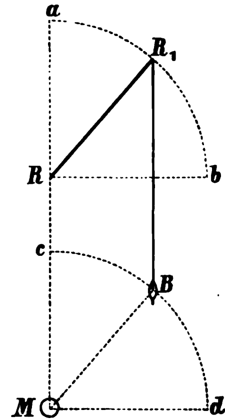


Fig. 187. Einrichtung, um Bogenlampen unter verschiedenen Winkeln zu photometrieren.

lampe B hängt. Der Abstand der Bogenlampe vom Spiegel M ist dann immer derselbe, nämlich $MB = RR_1$. Die Entfernung e der Bogenlampe B vom Schirme S ist dann $e = \overline{SM} + \overline{MB}$.

Da die Lichtstrahlen den Spiegel M immer unter demselben Winkel von 45° treffen müssen, bleibt auch der Lichtverlust durch die Reflexion immer derselbe; dieser Verlust kann daher ein- für allemal durch einen besonderen Versuch ermittelt werden.

Um den Lichtverlust durch Spiegelung an der Vorder- und Rückfläche der Zerstreuungslinse nicht in Rechnung ziehen zu müssen, schaltet man zwischen den Stab R des Photometers und die zum Vergleich dienende Lichtquelle (C in Fig. 186) eine Spiegelglasplatte ein.

Die Wirkung der Zerstreuungslinse wird in folgender Weise in Rechnung gezogen:

Es sei E (vergl. Fig. 188) die zu messende elektrische Lampe und e ihr Abstand von dem Schirme S. Dann würde, wenn die Zerstreuungslinse L, die sich in der Entfernung l vom Schirme S befindet, nicht vorhanden gewesen wäre, der Schirm S durch einen Lichtkegel getroffen worden sein, dessen Öffnung A auf dem Schirme S durch die Weite des Loches bestimmt wird, in dem die Linse L steckt. Der Flächeninhalt dieses Loches sei a. Wenn die Zerstreuungs-

linse L eingesetzt wird, scheint das Licht von einem um x vor der Linse gelegenen Punkte herzukommen, und das Licht verteilt sich nunmehr in einen Kegel, der auf dem Schirme S eine grössere Fläche A′ beleuchtet. Aus der Figur erkennt man sofort, dass folgende Beziehungen gelten müssen:

$$\frac{\text{Fläche A}}{\text{Fläche a}} = \frac{e^2}{(e-l)^2} \quad \text{und} \quad \frac{\text{Fläche A}'}{\text{Fläche a}} = \frac{(l+x)^2}{x^2}$$

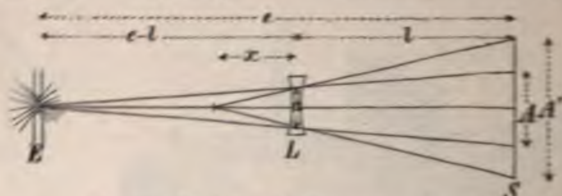


Fig. 188. Wirkung der Zerstreuungslinse.

Nach der bekannten Formel für Zerstreuungslinsen aber ist

$$\frac{1}{e-l} - \frac{1}{x} = -\frac{1}{f}, \text{ oder: } x = \frac{f \cdot (e-l)}{f+e-l},$$

wenn f die negative Brennweite der Zerstreuungslinse bedeutet. Daraus folgt, wenn man x eliminiert:

$$\frac{\text{Fläche A}'}{\text{Fläche A}} = \left[\frac{l \cdot (e-l) + f \cdot e}{e \cdot f}\right]^2.$$

In diesem Verhältnisse wird das Licht der Bogenlampe geschwächt; man hat daher:

$$\frac{\text{Lichtstärke der Bogenlampe}}{\text{Lichtstärke des Vergleichslichtes}} = \left[\frac{l \cdot (e-l) + f \cdot e}{c \cdot f}\right]^2, \qquad 6)$$

sofern c die Entfernung des Vergleichslichtes C vom Schirme S bedeutet.

Hat man den Spiegel M mit benutzt und den Schwächungskoëffizienten desselben (d. h. das Verhältnis der reflektierten zu den auf den Spiegel gefallenen Strahlen) zu β bestimmt, so muss vorstehendes Verhältnis (Gleich. 6) noch mit $\frac{1}{\beta}$ multipliziert werden.

6. Das Photometer von Rousseau.

Da es bei verschiedenen Lichtquellen, ganz besonders aber bei Bogenlampen, wünschenswert ist, die Helligkeit unter verschiedenen Winkeln zu messen und mit der Helligkeit zu vergleichen, welche dieselbe Lampe in einer bestimmten Richtung, z. B. in der horizontalen, aussendet, so hat Rousseau ein besonderes Photometer konstruiert, welches gestattet, die unter verschiedenen Richtungen von derselben Lichtquelle ausgeschickten Lichtmengen miteinander zu vergleichen.

Kleine Schwankungen in der Helligkeit sind zumal bei Bogenlampen nicht ganz zu vermeiden; das Verhältnis der in verschiedenen Richtungen ausgesendeten Strahlenmengen wird aber durch kleine derartige Schwankungen der gesamten Helligkeit nicht erheblich geändert; auch fällt, wenn man Bogenlicht mit Bogenlicht vergleicht, der störende Farbenunterschied der Lichtquellen weg, der sonst das Photometrieren von Bogenlampen sehr ungünstig beeinflusst. Die nebenstehende Fig. 189 zeigt diesen Apparat. Man hängt die Bogenlampe hinter die vertikal stehende, mit einer Kreisteilung versehene Scheibe, sodass der Lichtbogen sich gerade in der Höhe des Centrums dieser Scheibe befindet. Um dieses Centrum drehen sich zwei radiale Arme, die in Massstäben enden; diese Arme tragen zwei Spiegel N und M und zwei metallene Stäbchen m und n. Das an den Spiegeln reflektierte Licht der Bogenlampe erzeugt von diesen Stäbchen m und n zwei Schatten auf dem Schirme CD. Dieser Schirm CD wird durch eine Parallelogrammführung immer genau senkrecht zur Halbierungslinie des Winkels gestellt, den die beiden Arme miteinander einschliessen.

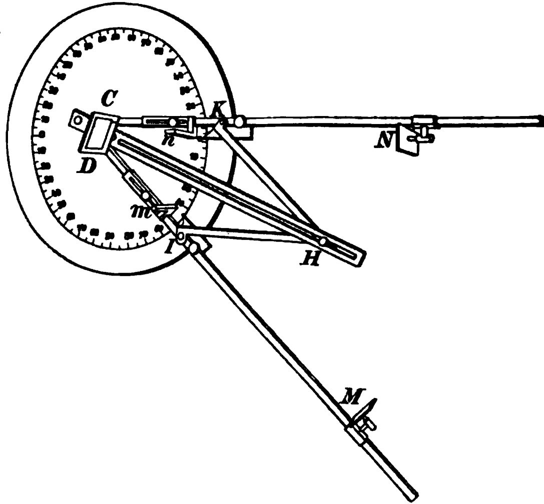


Fig. 189. Photometer von Rousseau.

Bei den Messungen klemmt man den einen Arm in horizontaler Richtung fest; den anderen Arm neigt man unter dem Winkel, unter dem die Lichtstärke gemessen werden soll. Die Spiegel M und N werden nun längs der Massstäbe so lange verschoben, bis die beiden Schatten gleich dunkel erscheinen. Sind D_h und D_φ die doppelten Abstände der Spiegel N und M vom Centrum der Scheibe, wenn beide Schatten gleich dunkel sind, so ist das gesuchte Verhältnis der Lichtstärken unter dem Winkel φ und in horizontaler Richtung:

$$\frac{i_\varphi}{i_h} = \frac{D_\varphi^2}{D_h^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 7)$$

Will man die Lichtstärke unter dem Winkel φ in absoluten Einheiten haben, so muss man die Lichtstärke in horizontaler Richtung i_h noch durch einen besonderen Versuch bestimmen.

7. Das Bunsen'sche Photometer.

Dieses Instrument ist in Deutschland weitaus das verbreitetste. Ein Schirm von ungleicher Lichtdurchlässigkeit wird entweder dadurch hergestellt, dass man auf einen Streifen weisses Papier einen Paraffinfleck macht oder dass man[1]) drei dünne Papiere übereinandergelegt, deren mittleres mit einem runden Loche versehen ist. Der durchscheinende Fleck erscheint hell auf dunklem Grunde, wenn von der Seite, die hinter dem Schirme liegt, mehr Licht herkommt als von vorn. Im auffallenden Lichte dagegen erscheint der Fleck dunkel auf hellem Grunde. Der Fleck verschwindet ganz, wenn er vorn und hinten gleich stark beleuchtet wird.

Man bringt daher die beiden Lichtquellen A und B (Fig. 190), deren Lichtstärke verglichen werden soll, auf beiden Seiten in der Normalen zum Schirme in solche Entfernungen, dass der durchscheinende Fleck o auf dem Schirme verschwindet. Um gleichzeitig beide Seiten des Schirmes mit demselben Auge beobachten zu können, bringt man hinter dem Schirme zwei ebene Spiegel mp und mq an oder einen Prismenapparat. Die Lichtquellen, die verglichen werden sollen, bleiben gewöhnlich an bestimmten Plätzen; zwischen ihnen wird der Schirm S auf einem Massstabe verschoben, der es gestattet, die Entfernung des Schirmes von beiden Lichtquellen abzulesen, wenn der Fleck auf beiden Seiten des Schirmes gleichzeitig verschwunden ist oder wenigstens auf beiden Seiten genau gleich hell erscheint. Sind dann die Entfernungen des Schirmes o von den

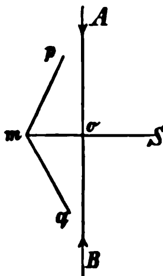


Fig. 190. Einrichtung des Bunsen'schen Photometers.

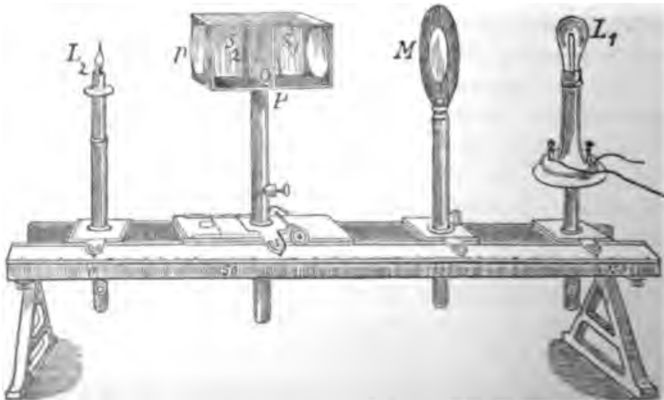


Fig. 191. Bunsen'sches Photometer.

[1]) Nach Töpler's Vorschlag.

beiden Lichtquellen A und B gleich l_A und l_B, so stehen deren Lichtstärken i_A und i_B in dem Verhältnisse:

$$i_A : i_B = l_A^2 : l_B^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

Nebenstehende Fig. 191 giebt eine Vorstellung von der äusseren Einrichtung eines solchen Bunsen'schen Photometers. L_1 und L_2 sind die beiden zu vergleichenden Lichtquellen; P mit o ist der Schirm nebst den Spiegeln S_1 und S_2; M bedeutet eine zur Schwächung der Lichtquelle L_1 eingeschaltete Dispersionslinse.

Die Arbeiten mit dem Bunsen'schen Photometer müssen in einem vollkommen dunkeln, überall mit mattschwarzer Farbe angestrichenen Raume vorgenommen werden. Das Auge, mit dem beobachtet wird, muss sich in der Ebene des Schirmes o befinden und soll durch passend angebrachte Schirme gegen direkte Strahlen der beiden Lichtquellen vollständig geschützt sein.

8. Das Photometer von Lummer und Brodhun.

Lotrecht zur Gleitschiene des Photometers steht der Schirm i k, der aus zwei Papierblättern besteht, zwischen die Stanniol gelegt ist. Das von diesem Schirme ausgehende diffuse Licht fällt auf die Spiegel e und f, die es senkrecht auf die Kathetenflächen b c und p d der beiden Glasprismen A und B werfen.

B ist ein total reflektierendes Prisma mit ebener Hypotenusenfläche, während beim Prisma A nur die das Prisma B berührende Kreisfläche r s eben, der übrige Teil s p und q r aber kugelförmig geschliffen ist. Alles auf die Kreisfläche r s fallende Licht geht vollständig hindurch, sodass ein bei o befindliches Auge des Beobachters Licht von f nur durch die Fläche r s, dagegen von e nur diejenigen Strahlen erhält, welche an a r und s b total reflektiert worden sind.

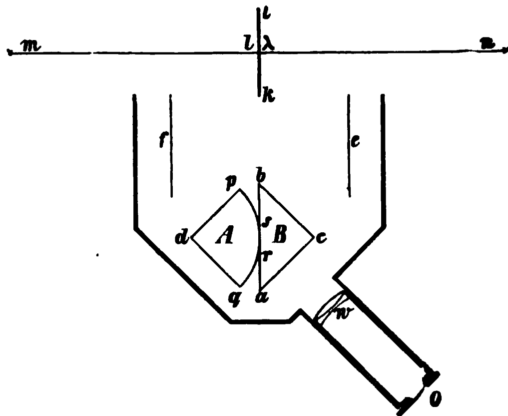


Fig. 192. Photometer von Lummer und Brodhun.

Auf die Hypotenusenfläche eines der beiden Prismen ist innerhalb des Kreises s r mit einem Sandstrahlgebläse eine zarte Figur geätzt. An den vertieften Stellen befindet sich Luft zwischen beiden Glasflächen, und die dort auffallenden Lichtstrahlen erfahren an der

Luftschicht Totalreflexion. Die Figur erhält hiernach nur Licht von der einen, der Teil des Feldes, in welchem Glas an Glas fest aneinanderliegt, nur Licht von der anderen Seite des Schirmes. Die Einstellung geschieht wie beim Bunsen'schen Photometer auf gleiche Helligkeit der Figur und des Feldes, also auf Verschwinden der Figur. Die Beobachtung geschieht durch eine Lupe w, die gerade die Figur deutlich sehen lässt. Die Empfindlichkeit dieses Instruments ist wesentlich grösser als die des Bunsen'schen.

9. Das Weber'sche Photometer.

Dieses Instrument bietet die grossen Vorteile dar, dass es leicht transportabel ist, dass es gestattet, unmittelbar Flächenhelligkeiten zu bestimmen, und dass man es unter beliebigem Winkel verwenden kann.

Der Apparat besteht aus zwei rechtwinklig aneinander stossenden, innen matt geschwärzten Metallröhren A und B. Die Röhre A ist horizontal und ruht auf einem Fusse F. Die Röhre B hingegen kann um das Rohr A als Achse beliebig gedreht werden. (Vergl. Fig. 193.)

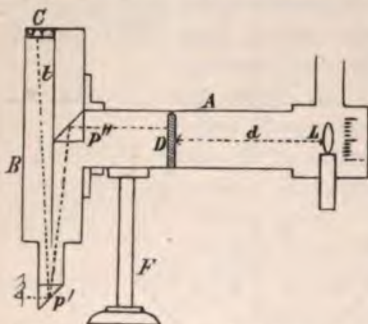


Fig. 193. Das Weber'sche Photometer.

Das Rohr A trägt am Ende eine Laterne mit einer regelbaren Normallampe L. Diese Normallampe sendet ihre Strahlen auf eine Milchglasscheibe D, die mittels eines innerhalb eines Längsschlitzes beweglichen Knopfes in dem Rohre A verschoben werden kann. Die Entfernung dieser Scheibe von der Normallampe kann an einer Skala abgelesen werden.

Das Rohr B ist durch eine Scheidewand in zwei Hälften geteilt, die eine ist vorn durch ein Milchglas C geschlossen; die andere Hälfte der Endplatte ist undurchsichtig; C richtet man nach der Stelle, deren Helligkeit oder Lichtintensität gemessen werden soll.

Blickt man mit dem Auge in das total reflektierende Prisma p', so sieht man dicht nebeneinander sowohl die durch die zu photometrierende Lichtquelle beleuchtete Platte C, als auch das an dem Prisma p" total reflektirte Bild des durch die Normallampe beleuchteten Milchglasschirmes D.

Bei einer gewissen Stellung des verschiebbaren Schirmes D erscheinen beide Schirme C und D gleich hell. Die Helligkeit der zu messenden Beleuchtung ist dann proportional $\frac{1}{d^2}$.

An einer seitlichen Skala liest man meist unmittelbar die Helligkeit in Lux ab.

Das Instrument ist besonders zur Messung von Flächenhelligkeiten sehr geeignet.

Will man sehr kräftige Lichtquellen, z. B. Bogenlampen, photometrieren, so bringt man vor C absorbierende Platten von Rauchglas, deren Absorptionskoëffizienten (Extinktionskoëffizienten) nachträglich genau ermittelt werden.

Haben die Lichtquellen sehr verschiedene Farbe, so schaltet man zwischen das Auge und das Prisma p′ einmal rotes und dann grünes Glas von bekannten absorbierenden Eigenschaften ein, oder man bedient sich einer durchsichtigen Zwischenschicht von bekannter Dicke, die nur Strahlen von der Wellenlänge $\lambda = 582\ \mu\mu$ durchlässt. (Vergl. dieses Kapitel, Abschn. 2, Seite 287, Fussnote.)

Gelegentlich versieht man auch die Schirme C und D mit Zeichnungen von zunehmender Feinheit und stellt die Platte D so ein, dass man auf beiden Platten gerade noch bis zu einem gleichen Grade die Feinheiten der Zeichnung deutlich erkennen kann.

10. Bestimmung der mittleren sphärischen Lichtintensität.

Bei Lichtquellen, die nach verschiedenen Richtungen hin Lichtströme von verschiedener Stärke aussenden, ist es üblich, die Lichtverteilung durch ein Polardiagramm darzustellen, indem man die Intensität in irgend einer Längeneinheit auf die Richtung der Strahlen aufträgt.

Auf diese Weise ist z. B. die linke Hälfte der Fig. 194 entstanden; die Kurve A B C D E F A stellt dar, wie das Licht einer offen brennenden Gleichstrom-Bogenlampe nach den verschiedenen Richtungen hin verteilt ist. Diese Kurve muss man um Q P als Achse rotieren lassen, alsdann stellt der Flächeninhalt der entstehenden Rotationsfläche den gesamten, von der Lampe ausgesendeten Lichtstrom dar.

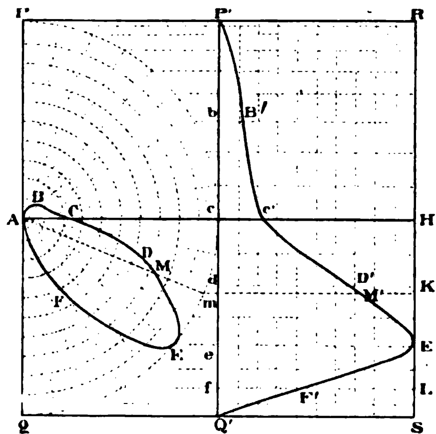


Fig. 194. Bestimmung der mittleren sphärischen Lichtstärke.

Der Radius der um A konstruierten Kugelfläche, die mit dieser Rotationsfläche gleichen Flächeninhalt hat, stellt die mittlere sphärische Intensität dar.

Ist der gesamte Lichtstrom einer Lampe Φ, so ist die mittlere sphärische Intensität

$$J_m = \frac{\Phi}{4\pi} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 9)$$

Nach **Rousseau** kann man noch ein anderes Verfahren zur Darstellung der Lichtverteilung wählen. Man trägt zu dem Zwecke auf die Projektionen der Kreisradien von der Projektionsachse P'Q' aus Normale auf, deren Längen gleich den Intensitäten in den Richtungen der Radien gemacht werden. Man erhält auf diese Weise die Kurve P'B'C'D'E'F'Q'. Die mittlere sphärische Helligkeit der Lichtquelle verhält sich dann zur maximalen wie die Fläche P'B'C'D'E'F'Q' zur Fläche des Rechteckes P'RSQ'.

Ist i die Intensität in der Richtung AD, so hat die zwischen AD und AM gelegene Kugelzone für den Radius 1 den Flächeninhalt $2\pi \cdot \cos\alpha \cdot d\alpha$, wenn $d\alpha$ den kleinen Winkel bedeutet, den AD und AM miteinander einschliessen. Der auf diese kleine Fläche entfallende Lichtstrom ist $2\pi \cdot i \cdot \cos\alpha \cdot d\alpha$. Die mittlere Lichtstärke in der von zwei Radien AD und AF begrenzten Zone, die durch die Winkel α und α' begrenzt wird, verhält sich somit zur maximalen wie die Flächen:

$$\frac{\text{Fläche d D'E'F'f}}{\text{Fläche d K L f}}.$$

Um also das Verhältnis der mittleren sphärischen Intensität zur maximalen zu ermitteln, braucht man nur das Verhältnis der Fläche P'B'C'D'E'F'Q' zur Fläche des Rechtecks P'RSQ' zu bilden.

Um also die mittlere sphärische Intensität zu bestimmen, ermittelt man die Intensitäten von 0 bis 180° in allen Winkeln von 10 zu 10° und zeichnet die Diagramme wie in Fig. 194 auf. Alsdann ermittelt man das Verhältnis der Flächeninhalte, indem man zunächst das Rechteck P'RSQ' ausschneidet und das Gewicht der Papierfläche auf einer genauen Wage bestimmt. Hierauf schneidet man aus diesem Rechteck die Fläche P'B'C'D'E'F'Q' aus und wiegt dieses Papierstück. Das Verhältnis der Gewichte ist gleich dem Verhältnis der Flächen. Das Verhältnis der Flächen ist gleich dem Quotienten aus Maximalintensität und mittlerer sphärischer Intensität.

Auch rechnerisch kann die mittlere sphärische Intensität ermittelt werden, indem man für jede Zone, die durch zwei benachbarte Winkel α_1 und α_2 begrenzt wird, die Grösse $\frac{1}{4} \cdot [\sin\alpha_1 - \sin\alpha_2] \cdot (J_1 + J_2)$ bildet, und alle diese Werte zwischen 0 und 180° addiert.

Handelt es sich nur um die mittlere **hemisphärische Intensität**, so werden nur die unter der Horizontalen gelegenen Zonen wie vorher addiert und ihre Summe durch 2 dividiert. Die oberhalb der Horizontalen gelegene Lichtausstrahlung bleibt unberücksichtigt. Da

diese bei vielen Lichtquellen, z. B. Gleichstrom-Bogenlampen, sehr klein ist, ist die mittlere hemisphärische Helligkeit nahezu das Doppelte der mittleren sphärischen Helligkeit.

Hinsichtlich der Definition der hemisphärischen Helligkeit gehen aber die Meinungen der Fachleute noch auseinander.

11. Das Ulbricht'sche Kugelphotometer.

Da sowohl Bogenlampen als Glühlampen nach verschiedenen Richtungen hin einen Lichtstrom von verschiedener Intensität aussenden, muss die mittlere sphärische oder hemisphärische Intensität nach dem im vorigen Kapitel angegebenen Verfahren aus möglichst zahlreichen Messungen rechnerisch oder graphisch mühsam ermittelt werden, und die auf diese Weise erreichbare Genauigkeit ist verhältnismässig gering.

Da es nun aber für den Vergleich von verschiedenen Glühlampen oder Bogenlichtkohlen gerade von Bedeutung ist, die mittlere räumliche Intensität zu ermitteln, hat Ulbricht,[1]) einen von Blondel zuerst angeregten Gedanken verfolgend, eine sinnreiche Einrichtung erdacht, welche gestattet, die mittlere sphärische Lichtstärke durch eine einzige photometrische Messung mit einer für die meisten praktischen Bedürfnisse ausreichenden Genauigkeit zu ermitteln.

Er geht von der Thatsache aus, dass eine innen mattweiss mit einer diffus reflektierenden Masse ausgestrichene Hohlkugel von einer irgendwo innerhalb derselben befindlichen Lichtquelle mit beliebiger Lichtverteilung an allen Stellen völlig gleichförmig beleuchtet wird. Wird nämlich von einem weiss gestrichenen Flächenstück der Bruchteil a des Lichtstromes verschluckt, der Rest $1 - a$ aber völlig gleichmässig diffus reflektiert, so wird der direkt ausgesendete Lichtstrom $4\pi J$ einer Lichtquelle an den Wänden der Hohlkugel eine sich bis zur völligen Absorption des Lichtes wiederholende Reflexion erfahren. Die Summe der einzelnen Lichtströme ist:

$$(1-a)\,4\pi J + (1-a)^2\,4\pi J + (1-a)^3 \cdot 4\pi J + \ldots = \frac{1-a}{a} \cdot 4\pi J.$$

Beträgt der Radius der innen weissen Kugel r, so ist die gleichförmige Beleuchtung B_r der Innenfläche durch reflektiertes Licht für jede beliebige Flächeneinheit:

$$B_r = \frac{1-a}{a} \cdot \frac{J_m}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10)$$

B_r ist hiernach eine der mittleren sphärischen Intensität, J_m der Lichtquelle direkt proportionale Grösse.

---

[1]) Vergl. ETZ, Bd. XXI (1900), S. 595.

Ist die Lichtquelle nicht zu ausgedehnt, so lässt sich ihre direkte Wirkung auf einen kleinen Teil der Wandfläche durch eine kleine, in der Nähe der Lichtquelle angebrachte Blende aufheben, und die Anbringung dieser Blende wird die Lichtverteilung in der Kugel nicht sehr stören, wenn sie verhältnismässig klein im Vergleich zur Kugelfläche ist, ebenfalls weiss angestrichen oder passend durchscheinend gewählt wird.

Die Helligkeit der aus einer durch die Blende beschatteten Öffnung austretenden Beleuchtung B_r misst man mit einem beliebigen Photometer.

Fig. 195 zeigt die Einrichtung des Ulbricht'schen Apparates. Die Kugel von mindestens 50 *cm* Durchmesser ist entweder aus

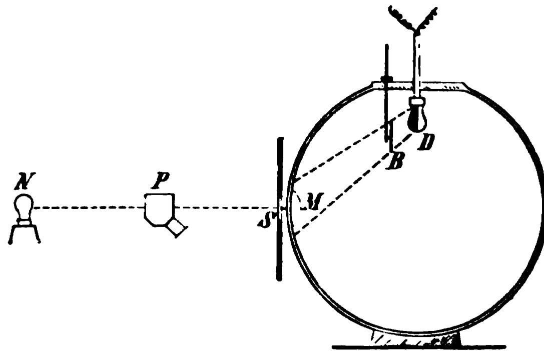


Fig. 195. Ulbrichts Kugelphotometer.

Milchglas oder aus Metall hergestellt. Der Innenraum, der obere Deckel, die Blende und alle sonst im Innern befindlichen Gegenstände werden mit einem matten, lichtundurchlässigen, weissen Überzug versehen, den man aus einer Mischung von Kreide und Wasserglas herstellt. Nach dem Erhärten wird der Überzug noch matt geschliffen, um eine möglichst allseitig gleichförmige, diffuse Reflexion zu erhalten. Nur die kleine seitliche Öffnung M von etwa 11 *cm* bleibt frei, um durch dieselbe die diffuse Innenbeleuchtung beobachten zu können.

Als Blende B dient eine kleine weisse, halb durchsichtige Scheibe B von 20 *cm* Durchmesser, die in geringem Abstande von der Lichtquelle L befestigt und gegen die Richtung, in der die Strahlen auf sie fallen, geneigt ist.

Der Ort, an dem die Lichtquelle L untergebracht wird, ist ohne Einfluss auf die Messung.

Vor der Öffnung M wird ausserhalb der Kugel ein undurchsichtiger Schirm S, der mit einer kleineren, kreisrunden Öffnung

versehen ist, aufgestellt. Diese Öffnung befindet sich im Nullpunkte der Photometerbank. P bedeutet in der Figur das Photometer (im vorliegenden Falle ein Lummer-Brodhun'sches), N ist die Normalflamme.

Wir haben gesehen, dass die gleichförmige Flächenbeleuchtung durch diffus reflektiertes Licht, bezogen auf die Flächeneinheit, die Grösse B_r, der mittleren räumlichen Intensität J_m der Lichtquelle proportional ist, welches auch immer die Verteilung der Intensität sein mag. Verwendet man nun aber eine Milchglasglocke, so kann man durch die Öffnung M nicht B_r selbst beobachten, sondern es gelangt nur ein durch die Absorption dieser Glocke bedingter Bruchteil $H = c \cdot B_r$ nach aussen und erscheint uns als Flächenhelligkeit der Öffnung im Schirme S. Diese Flächenhelligkeit ist aber der Grösse B_r, und B_r wiederum der mittleren sphärischen Lichtstärke J_m proportional.

Man hat somit schliesslich:

$$H = C \cdot J \qquad \text{11)}$$

Um absolute Bestimmungen zu erhalten, muss man demnach noch diesen Proportionalitätsfaktor C ermitteln, der von dem Absorptionskoëffizienten a und c, der Grösse der Öffnung im Schirme S und von dem Radius r der Kugel abhängt.

Zu diesem Zwecke bestimmt man sorgfältig die mittlere sphärische Helligkeit J_1 einer Glühlampe auf bekannte Weise, und misst mit dem Kugel-Photometer den zugehörigen Wert H_1. Alsdann ist

$$C = \frac{H_1}{J_1} \qquad \text{12)}$$

Da sich die Lichtaussendung von Glühlampen auch bei völlig konstanter Spannung durch den Gebrauch mit der Zeit langsam ändert, und man nicht sicher ist, ob der Koëffizient a (Absorption des mattweissen Anstrichs) nicht auch zeitlichen Änderungen unterworfen ist, so bestimmt man unmittelbar nach der Ermittelung des Proportionalitätsfaktors C mit dessen Hilfe die mittlere sphärische Intensität J einer Anzahl Glühlampen und benutzt dann späterhin diese Lampen, um von Zeit zu Zeit den Wert von C aufs neue festzustellen.

12. Beleuchtungskurven.

Sehr häufig wünscht man sich über die Verteilung der Beleuchtung in einem Raume ein Bild zu machen. Man kann zu diesem Zwecke auf verschiedene Weise verfahren.

Kennt man die Lichtströme, die eine Lichtquelle unter verschiedenen Winkeln aussendet, so kann man, wenn man von der reflektierenden oder zerstreuenden Wirkung aller Wände und Gegen-

stände, die sich im Raume befinden, absieht, die Helligkeit für ein beliebiges Stück der Bodenfläche von der Grösse der Flächeneinheit berechnen.

Ist a der Einfallswinkel, J die Intensität der Lichtquelle in der Richtung des einfallenden Strahles, r die Entfernung der bestrahlten Flächeneinheit von der Lichtquelle, so ist die Beleuchtung B

$$B = \frac{J \cdot \cos a}{r^2} \text{ Lux} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

Sind verschiedene Lichtquellen vorhanden, so wiederholt man diese Rechnung für jede derselben und bildet schliesslich die Summe der Einzelbeleuchtungen.

Dies wiederholt man für möglichst viele Punkte der betreffenden Ebene und verbindet die Punkte gleicher Helligkeit durch Kurven.

Ausserdem pflegt man noch die Helligkeitsverteilung in verschiedenen Vertikalebenen darzustellen, indem man die horizontalen Abstände von der Lichtquelle als Abscissen und die Helligkeiten als Ordinaten aufträgt.

Will man die Lichtverteilung auf einem freien Platze erhalten, der durch mehrere Lichtquellen beleuchtet wird, so konstruiert man um jede einzelne Lichtquelle auf dem Grundriss eine Anzahl konzentrische Kreise, die gewissen bekannten gleichen Bodenhelligkeiten entsprechen. An den Schnittpunkten der Kreise addiert man die von sämtlichen verschiedenen Lichtquellen herrührenden Beleuchtungseffekte und konstruiert, wenn dies für recht viele Punkte geschehen ist, die Kurven gleicher Bodenhelligkeit.

XV. Kapitel.

Magnetische Messungen.

A. Messung der Stärke von Magnetfeldern.

1. Schwingungsmethode.

Im Kap. V, Abschn. 12, S. 111, haben wir gezeigt, dass die Dauer T einer Hin- und Rückschwingung einer Magnetnadel in einem gleichförmigen Magnetfelde von der Stärke $\mathfrak{H}$ durch die Formel

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Omega}{\mathfrak{H} \cdot M \cdot l}}$$

ausgedrückt wird, wenn man mit Ω das Trägheitsmoment und mit $M \cdot l$ das magnetische Moment der Nadel bezeichnet. Daraus folgt:

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi^2 \Omega}{T^2 M l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Sind also Trägheitsmoment Ω und magnetisches Moment $M \cdot l$ der Nadel aus anderweiten Versuchen bekannt, so kann die Feldstärke $\mathfrak{H}$ aus Beobachtungen der Schwingungsdauer der Nadel in absoluten Einheiten erhalten werden.

Dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass das magnetische Moment der Nadel durch die Einwirkung des Feldes keine Veränderung erfährt. Für schwächere Felder darf dies angenommen werden.

2. Messung schwacher Felder mit der Tangentenbussole und dem Voltameter.

In das magnetische Feld, dessen Stärke gemessen werden soll, bringt man eine Tangentenbussole und stellt die Ebene des Ringes in die Richtung der Kraftlinien. Hierauf sendet man durch die Windungen einen Strom, dessen Stärke man gleichzeitig durch ein Voltameter (Knallgasvoltameter oder Silbervoltameter, vergl. Kap. III, Abschn. 4, S. 81) bestimmt. Man beobachtet den Winkel φ, um welchen die Nadel der Tangentenbussole abgelenkt wird, wenn man den Strom in der einen und in der entgegengesetzten Richtung durch den Ring sendet; aus beiden Ausschlägen nimmt man das Mittel. Gleichzeitig ermittelt man mit Hilfe des Voltameters die Stromstärke i.

Bekanntlich gilt (vergl. Kap. VI, Abschn. 9, S. 140, Gleich. 21) für die Tangentenbussole die Formel:

$$i = \frac{10 \cdot \mathfrak{H} \cdot R}{2 \pi n} \cdot \operatorname{tang} \varphi$$

und daraus

$$\mathfrak{H} = \frac{2 \pi n i}{10 R \cdot \operatorname{tang} \varphi} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

Hierin ist $\mathfrak{H}$ die gesuchte Feldstärke, n die Anzahl und R der mittlere Halbmesser der Windungen. Auf diese Weise ist man in der Lage mit den einfachsten Hilfsmitteln die Stärke eines Feldes mit horizontal gerichteten Kraftlinien an einer bestimmten Stelle in absoluten Einheiten zu ermitteln, und kann dieses Feld dann benutzen, um andere Feldstärken damit zu vergleichen, andere Messinstrumente nach diesem Felde zu aichen.

3. Messung mit einer Wismutspirale.

Zur Bestimmung der Richtung der Kraftlinien an irgend einer Stelle bedient man sich einer kleinen, durch eine cardanische Aufhängung vollkommen frei beweglichen Magnetnadel, wie solche Fig. 196 darstellt.

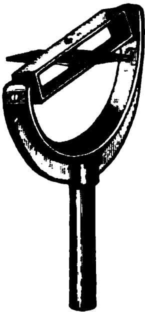
Von Righi ist im Jahre 1883 die eigentümliche Eigenschaft des Wismuts entdeckt worden, dass dieses Metall seinen elektrischen Leitungswiderstand vergrössert, wenn es in ein Magnetfeld gebracht wird. Nach den Beobachtungen von Lenard und Howard kann man aus der Vergrösserung des Widerstandes auf die Feldstärke schliessen. Bezeichnet

$$A = \frac{w - w_0}{w_0}$$

die Änderung des Widerstandes, so ist die Feldstärke $\mathfrak{H}$:

$$\mathfrak{H} = \alpha \cdot \sqrt{A \cdot (A + \beta)}, \quad . \; . \; . \; . \quad 3)$$

wobei α und β zwei konstante Zahlen sind. Für grössere Feldstärken (über 6000 absolute Einheiten) kann die Widerstandsänderung der Feldstärke ohne weiteres proportional gesetzt werden.


Fig. 196. Richtungszeiger für Kraftlinien.

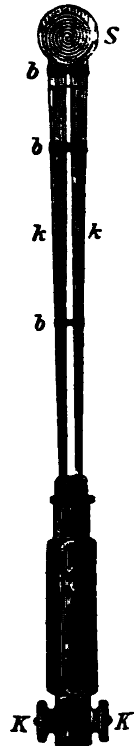


Fig. 197. Wismutspirale zur Messung magnetischer Felder.

Hartmann & Braun haben ein einfaches Instrument konstruiert (vergl. Fig. 197), das zur praktischen Anwendung in der Elektrotechnik gelegentlich geeignet ist. Ein dünner Wismutdraht ist zu einer induktionsfreien Spirale S zusammengewickelt und mit den Enden an die von einander

isolierten Kupferstäbe kk angelötet, die unten in Klemmschrauben KK enden. Die Dicke der Spirale beträgt nicht ganz 1 *mm*, sodass dieselbe auch in den schmalen Luftzwischenraum zwischen den Polschuhen und dem Anker von Dynamomaschinen eingebracht werden kann. Um die Spirale vor Beschädigungen zu schützen, sind beide Seitenflächen derselben mit dünnen Glimmerblättchen bedeckt.

Bei den Messungen hält man die Spirale senkrecht zur Richtung der Kraftlinien; man bringt sie also in die Richtung, in der ihr Widerstand am grössten ist.

Die Messung des Widerstandes erfolgt mit Hilfe der Wheatstoneschen Brücke (vergl. Kap. XIII, Abschn. 2, S. 266). Da die Leitungsfähigkeit des Wismuts sich stark mit der Temperatur ändert, müssen die Messungen des Widerstandes w im magnetischen Felde und des Widerstandes w_0 ausserhalb des Feldes möglichst rasch hintereinander ausgeführt werden. Aus w und w_0 bestimmt man A. Die Konstanten α und β werden vom Fabrikanten für jedes Exemplar des Instrumentes ermittelt und angegeben, oder es wird eine Aichungskurve beigefügt, in der die Grössen $A = \frac{w - w_0}{w_0}$ als Ordinaten und die zugehörigen Feldstärken $\mathfrak{H}$ als Abscissen aufgetragen werden.

B. Methoden der Untersuchung der magnetischen Eigenschaften des Eisens.

1. Allgemeines über magnetische Untersuchungen; Scheerungslinien.

Es giebt Methoden zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften des Eisens, durch deren Anwendung man absolute Werte erhält, d. h. Werte, die auf Hauptdimensionen zurückgeführt sind. Für die Praxis des Elektrotechnikers genügen aber zumeist auch Verfahren, die relative Angaben liefern, d. h. Angaben, die auf magnetische Normalien bezogen sind.

Will man absolute Messungen anstellen, so muss man dem Probestück die Gestalt eines Rotationsellipsoides mit langer Rotationsachse geben und Beobachtungen mit dem Magnetometer nach der Ablenkungsmethode anstellen, oder man muss dem Probestück die Gestalt eines geschlossenen Ringes geben und die ballistische Methode benutzen.

Für relative Messungen stehen ausser der ballistischen Methode ferner die Schlussjochmethode, elektrodynamische Methoden und die Zugkraftmethoden zur Verfügung. Bei allen diesen Verfahren wird ein aus dem zu prüfenden Material hergestellter langer Stab als Probestück verwendet.

Durch ein einfaches Verfahren, welches man **Scheerung** nennt, ist es meist möglich, die nach einer der genannten Methoden erhaltenen relativen Zahlen mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit in absolute umzusetzen.

Vergleicht man nämlich Magnetkurven einer Eisensorte, die nach einer absoluten Methode erhalten worden sind, mit der Kurve, die für dasselbe Probestück nach einem anderen Verfahren gewonnen worden sind, das nur relative Zahlen giebt, so findet man meist, dass die beiden Kurven in ihrem Verlaufe einander ausserordentlich ähnlich sind, dass aber die eine gegen die andere Kurve gewissermassen verschoben erscheint.

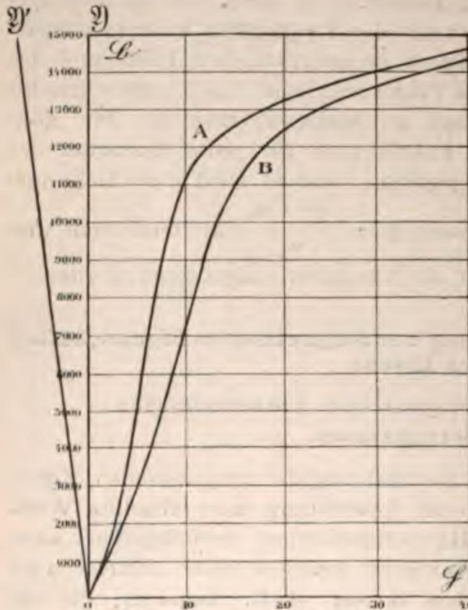


Fig. 198. Anwendung der Scheerung.

In Fig. 198 sei A z. B. die nach einer absoluten, B die nach einer relativen Methode für dasselbe Stück erhaltene Kurve. Man kann aber B mit A fast völlig zur Deckung bringen, wenn man die Feldstärke $\mathfrak{H}$ nicht von der Ordinatenachse O𝔜, sondern von einer schrägen Achse O𝔜′ aus aufträgt.

Diese Hilfsachse O𝔜′ nennt man dann die **Scheerungslinie** und diese Verschiebung (nicht Drehung) der Kurve B in die Kurve A die **Scheerung**.

Bei Hysteresisschleifen (vergl. Kap. V, Abschn. 17, S. 119) hat selbstverständlich jeder einzelne der vier Teile der Schleife seine eigene Scheerungslinie.

Mit einer für die Praxis genügenden Genauigkeit kann also die Annahme gemacht werden, dass die Feldstärkewerte $\mathfrak{H}_B$ um einen gewissen Wert vermindert werden müssen, der proportional der Induktion $\mathfrak{B}$ ist.

Man bestimmt also, wenn man sich einer Methode zu magnetischen Untersuchungen bedienen will, die nur relative Werte liefert, die magnetische Kurve eines Probestückes nach dieser Methode, hierauf dreht man dasselbe Probestück (zumeist ein cylindrischer Stab) zu einem Rotationsellipsoid ab, und ermittelt für dieses die

absolute Kurve nach der Ablenkungsmethode[1]). Aus dem Vergleich der beiden Kurven ergiebt sich dann die Scheerungslinie.

Hat man auf diese Weise für verschiedene Eisensorten für jede die zugehörige Scheerungslinie ermittelt, so kann man unbedenklich annehmen, dass diese Scheerungslinie auch für andere Stäbe gleicher Art gebraucht werden kann.

2. Die magnetometrische Methode.

Aus dem zu untersuchenden Material wird ein längliches Rotationsellipsoid gedreht. Die Rotationsachse, welche gleichzeitig die grosse Achse der Ellipse ist, wird in die Mitte einer langen Magnetisierungsspule gebracht.

An einem Magnetometer, d. i. ein kleiner, an einem Coconfaden aufgehängter, horizontal drehbarer Magnetstab, beobachtet man die Ablenkungen, welche das Ellipsoid bei verschiedenen Magnetisierungen hervorruft. Aus dieser Ablenkung, Grösse und Entfernung des Ellipsoides, sowie der bekannten Stärke der Horizontalkomponente des Erdmagnetismus H, kann man die Magnetisierungsintensität des Ellipsoides und daraus $\mathfrak{L}$ berechnen[2]).

Die Einwirkung der magnetisierenden Spule auf das Magnetometer wird dadurch aufgehoben, dass man auf der entgegengesetzten Seite in gleicher Entfernung eine genau kongruente Spule, die von demselben Strome durchflossen wird, so aufstellt, dass die ablenkenden Wirkungen beider Spulen auf das Magnetometer sich gerade gegenseitig aufheben.

Die magnetometrische Methode erfordert eisenfreie Räume und erschütterungsfreie Aufstellung der Instrumente; sie ist daher nur für das physikalische Laboratorium und nicht für das Arbeitszimmer des Elektrotechnikers geeignet.

3. Die ballistische Methode.

Bei diesem Verfahren misst man die Elektrizitätsmenge kurzer Stromstösse durch den Ausschlagswinkel eines Galvanometers, dessen Nadel eine Schwingungsdauer besitzt, die im Vergleich zur Zeitdauer eines Stromstosses sehr gross ist.

Man nennt solche Galvanometer, die meist nur geringe Dämpfung besitzen, ballistische Galvanometer.

---

[1]) Absolute Induktionskurven eines Probestabes werden in der II. Abteilung der Physikalisch Technischen Reichsanstalt in Charlottenburg bestimmt.

[2]) Näheres findet man bei Ewing, Magnetische Induktion im Eisen etc. Deutsch v. Holborn u. Lindeck, S. 36.

Will man die magnetischen Eigenschaften einer Eisensorte untersuchen, so wählt man, um die Rückwirkung der Pole unmerklich zu machen, einen Stab, dessen Länge mindestens das 300fache seiner Dicke beträgt, und umwickelt denselben in seiner Mitte ganz dicht mit einer einzigen Lage Draht und verbindet, am besten durch ein dünnes konzentrisches Kabel, die so entstandene Induktionsspule D (vergl. Fig. 199) mit einem ballistischen Galvanometer G (vergl. Kap. V, Abschn. 15, S. 151). Den Eisenstab samt Induktionsspule D führt man alsdann in eine lange magnetisierende Spirale S S ein, durch deren Windungen man Ströme von bekannter Stärke sendet. Schliesst,

Fig. 199. Anordnung für Anwendung der ballistischen Methode.

verstärkt, schwächt oder öffnet man den Strom, den die Batterie B liefert, so fliesst eine Elektrizitätsmenge q

$$q = \frac{\Delta\mathfrak{B} \cdot n}{R \cdot 10^8} \text{ Coulomb} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4)$$

durch das Galvanometer, wenn n die Anzahl der Windungen der Induktionsspule, $\Delta\mathfrak{B}$ die Anzahl der Kraftlinien ist, um welche sich die Feldstärke im Eisenstücke ändert, und R den Widerstand von Induktionsspirale samt Galvanometer und Ballastwiderstand bedeutet.

Der erste Ausschlagswinkel α der Galvanometernadel wird beobachtet, und es ist:[1])

$$q = k \cdot \sin \frac{1}{2} \alpha.$$

Man findet somit:

$$\Delta \mathfrak{B} = \frac{k \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot 10^8}{n} \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

4. Aichung des ballistischen Galvanometers.

Die Konstante k des ballistischen Galvanometers bestimmt man durch besondere Beobachtungen[2]), z. B. dadurch, dass man eine Spule von sehr vielen Windungen und sehr grosser Windungsfläche (Webers Erdinduktor genannt) rasch aus einer zur Richtung des magnetischen Meridians senkrechten Ebene um 180° um einen Durchmesser dreht, nachdem man zuvor auf andere Weise die Feldstärke der erdmagnetischen Kraft an derselben Stelle bestimmt hat[3]).

Die Feldstärke ändert sich in diesem Falle um den Wert 2 H.

[1]) Für sehr kleine Ausschlagswinkel, die man nach der Poggendorff'schen Methode der Spiegelablesung ermittelt, ist:

$$\alpha = \frac{a}{2\,A} - \frac{1}{6}\,\frac{a^3}{A^3} + \frac{1}{10}\,\frac{a^5}{A^5} - + \cdots\cdots$$

wenn man mit a die Ablenkung (in *mm* Skalenteilen) und mit A den Abstand der Skala vom Spiegel des Galvanometers in *mm* bezeichnet.

Zumeist ist ausreichend genau:

$$\alpha = \frac{a}{2\,A}.$$

[2]) Bei Gebrauch des ballistischen Galvanometers ist zu unterscheiden, ob dasselbe ohne oder mit Dämpfung gebraucht wird.

Ist keine Dämpfung vorhanden, so ist die Elektrizitätsmenge Q in Coulomb, die einen Stromstoss veranlasst, der den Ausschlag α veranlasst:

$$Q = \frac{C}{2\,A} \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot \alpha,$$

wenn C den gewöhnlichen Reduktionsfaktor des Galvanometers, τ die Schwingungsdauer der Galvanometernadel und d den Abstand der Skala vom Spiegel bedeutet.

Bei Gebrauch der Dämpfung ist:

$$Q = \frac{C}{2\,A} \cdot \frac{T}{\sqrt{\pi^2 + \Delta}} \cdot k^{\frac{1}{\pi} \cdot \arctan \frac{\pi}{\Delta}} \cdot \alpha,$$

$$\text{oder näherungsweise } Q = \frac{C}{2\,A} \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot \alpha \cdot \left(1 + \frac{\Delta}{2}\right),$$

wenn T die Schwingungsdauer der gedämpften Nadel, Δ = lognat k das natürlich logarithmische Dekrement der Dämpfung ist.

[3]) In der ersten Auflage dieses Buches war empfohlen worden, die Galvanometerkonstante folgendermassen zu bestimmen. Man sendet durch das Galvanometer diejenige Elektrizitätsmenge, die frei wird, wenn man einen durch eine Batterie von bekannter EMK geladenen Kondensator von bekannter Kapazität entladet, und beobachtet den Ausschlag. Da aber bei Kondensatoren durch die Rückstandsbildung Unsicherheiten entstehen, ist von diesem Verfahren neuerdings zumeist Abstand genommen worden.

Da das erdmagnetische Feld sehr schwach ist, verfährt man vielfach auch so, dass man auf ein genau cylindrisches Glasrohr von etwa 4 bis 5 *cm* äusserem Durchmesser und etwa 1 *m* Länge eine Lage gut umsponnenen Kupferdrahtes gleichmässig aufwickelt. In die Mitte dieses Rohres bringt man die Sekundärspule, die späterhin bei den magnetischen Untersuchungen verwendet werden soll. Bei der Aichung darf im Innern der Spule kein Eisen vorhanden sein.

Wenn man einen Strom von der Stärke i durch die Normalspule hindurchsendet, gehen durch den gesamten Querschnitt q_p der Primärspule $\frac{4\pi n_p \cdot i \cdot q_p}{l}$ Kraftlinien. Durch den Querschnitt der sekundären Spule, deren Querschnitt q_s ist, gehen $\frac{4\pi n_p \cdot i \cdot q_s}{l}$ Kraftlinien. Kommutiert man den Strom i, so ändert sich die Kraftlinienzahl um das Doppelte dieses Betrages. Beobachtet man den Ausschlag, der beim Kommutieren am ballistischen Galvanometer entsteht, so kann man aus Ausschlag und Kraftlinienzahl die Konstante des Galvanometers bestimmen.

Derartige Normalspulen kann man in der Physikalisch Technischen Reichsanstalt aichen lassen.

Da das ballistische Galvanometer eigentlich vor jeder Messungsreihe neu geaicht werden muss, wenn es sich um genaue Bestimmungen handelt, und weil das Arbeiten mit einer Hilfsspule zeitraubend ist, so benutzt man zur Bestimmung der Galvanometerkonstante vielfach auch den Weber'schen Doppelmagnet-Induktor.

Dieser Apparat besteht aus zwei gleich stark magnetisierten Stabmagneten N′S′ und N″S″, die in einem Rohre einander so gegenüber gestellt sind, dass gleiche Pole sich gegenüberstehen. Auf dem Rohre ist eine Spule E derart zwischen zwei Anschlägen verschiebbar, dass die Mitte der Spule jedesmal, wenn die Verschiebung so weit als möglich erfolgt ist, gerade über der Mitte eines der beiden Magnete steht.

Die verschiebbare Spule verbindet man mit dem ballistischen Galvanometer, dessen Konstante bestimmt werden soll, und beobachtet den Ausschlag, den man erhält, wenn man die Spule rasch aus der einen in die andere Endstellung bringt.

Ist dieser Ausschlag einmal mit dem Ausschlag einer bekannten Normalspule von bekannten Dimensionen verglichen, so ist hierdurch der Magnetinduktor geaicht und kann zur Aichung beliebig vieler Galvanometer dienen.

Da der Magnetismus der Stäbe nicht völlig unveränderlich ist, muss die Vergleichung mit einer Normalspule von Zeit zu Zeit wiederholt werden.

Wir haben der Bestimmung der Konstanten des ballistischen Galvanometers soviel Raum gewidmet, weil dieses Instrument auch für andere Zwecke (z. B. für Untersuchungen der magnetischen Streuung, Kondensatorbeobachtungen u. s. f.) in der Elektrotechnik vielfach Anwendung findet.

5. Die Anwendung der ballistischen Methode.

Die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$ im Eisen ist, wenn Φ gefunden worden ist:

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{Q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

wenn Q der Querschnitt des Eisenkernes ist.

Die Feldintensität $\mathfrak{H}$ der magnetisierenden Spule berechnet man nach der Formel (vergl. Kap. VI, Abschn. 3, S. 128, Gleich. 2):

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi \cdot z \cdot i}{10\, l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

wo i in Ampère die Stromstärke, l die Länge in *cm* und z die Windungszahl der Spule bedeutet. $\mathfrak{H}$ ist in dieser Formel die Zahl der Kraftlinien in 1 *qcm* Fläche.

Ist eine entmagnetisierende Kraft vorhanden, so muss man später die erhaltenen Kurven noch scheeren.

Wenn man die Magnetisierungskurve (Kap. V, Abschn. 16, S. 115) für eine Eisenprobe bestimmen will, so bestimmt man die Grösse $\mathfrak{B}$ für möglichst viele Werte von $\mathfrak{H}$. Man beginnt mit ganz schwachen magnetisierenden Kräften $\mathfrak{H}$ und lässt dann, ohne den Strom zu unterbrechen, die Stärke i desselben allmählich wachsen; gleichzeitig beobachtet man den Ausschlag des ballistischen Galvanometers für jede solche Zunahme. Um rasch allmähliche Steigerungen der Stromstärke hervorbringen zu können, bedient man sich am besten eines Flüssigkeitswiderstandes (W in Fig. 199), z. B. eines Kupfervoltameters mit verschiebbaren Platten, die man immer näher zusammenrückt. Die Stromstärke i misst man an einem Ampèremeter A; den Umschalter U benutzt man, wenn man die Stromrichtung umkehren will.

Die durch die Änderung $\Delta\mathfrak{B}$ der magnetischen Induktion in der Sekundärspule erzeugte EMK ($\int \varepsilon \cdot dt$) ist:

$$n_s \cdot Q \cdot \Delta\mathfrak{B},$$

wenn n_s die Windungszahl der Sekundärspule und Q der Querschnitt des Probestabes ist.

Die gesamte Elektrizitätsmenge C des Induktionsstosses ist:

$$C = \frac{n_s \cdot Q \cdot \Delta\mathfrak{B}}{w_s} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

wenn w_s der gesamte Widerstand des Galvanometers, der etwa vorgeschalteten Widerstände und der Zuleitungen ist.

Man erhält
$$\Delta\mathfrak{B} = \frac{w_s \cdot \alpha}{n_s \cdot Q} \cdot \frac{1}{k} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 9)$$
wenn α der erste Ausschlagswinkel des Galvanometers ist.

Durch Summierung der einzelnen Werte von $\Delta\mathfrak{B}$ erhält man die Grösse $\mathfrak{B}$ selbst.

Es ist an diesen Messungen noch eine Korrektion anzubringen, die nicht vernachlässigt werden darf, wenn man zu hohen Feldstärken ansteigt, und wenn der mittlere Querschnitt der Sekundärspule erheblich grösser ist, als der Querschnitt des Eisenstabes.

Von den durch die Beobachtungen ermittelten Werten von $\Delta\mathfrak{B}$ sind nämlich diejenigen Kraftlinien abzuziehen, die zwischen der Mantelfläche des Eisenstabes und dem mittleren Wickelungsumfange der Sekundärspule verlaufen. Es sind dies bei einer Änderung der Feldstärke um $\Delta\mathfrak{H}$ nämlich $(Q' - Q) \cdot \Delta\mathfrak{H}$ Kraftlinien, wenn man mit Q' den mittleren Querschnitt der Sekundärspule und mit Q den Querschnitt des Eisenstabes bezeichnet.

In Wirklichkeit ist also:
$$\Delta\mathfrak{B} = \frac{w_s \cdot \alpha}{n_s \cdot Q \cdot k} - \frac{(Q' - Q) \cdot \Delta\mathfrak{H}}{Q} \quad \ldots \quad 10)$$

6. Die Jochmethode.

Einen Ring aus dem zu prüfenden Eisen herzustellen, ist im allgemeinen zu mühsam, zu zeitraubend und mit zu grossen Veränderungen des Materials durch Bearbeitung verbunden.

Man wendet daher die Probestücke meist in Stabform an, und bedient sich der von J. Hopkinson zuerst angegebenen Schlussjochmethode.

Die entmagnetisierende Rückwirkung der Enden der Probestücke wird dadurch beseitigt, dass man diese Enden durch ein Eisenstück von grossem Querschnitt und hoher Permeabilität verbindet, das dem Durchgang der Kraftlinien einen Widerstand von vernachlässigbarer Grösse darbietet.

Nebenstehende Figuren 200 und 201 zeigen z. B. die Anordnung, deren man sich in der Physikalisch Technischen Reichsanstalt bedient.

Im Hohlraume des aus Krupp'schem Stahlguss hergestellten Eisenkörpers befindet sich die magnetisierende (dicke) Spule. Der Probestab wird durch seitliche Öffnungen durchgeführt; auf ihn ist die Sekundärspule aufgewickelt. Der Stab ist länger als das Joch; seine Mitte, auf der sich die Sekundärspule befindet, wird in die Mitte der magnetisierenden Spule gebracht.

Um eine gute magnetische Verbindung zwischen Joch und Probestück herzustellen, dienen Backen aus weichem Eisen, die durch Schrauben (an der Vorderseite des Joches sichtbar) angepresst werden.

Allerdings bleiben noch immer einige Fugen zwischen Probestück und Joch; eine geringfügige entmagnetisierende Kraft ist also bei dieser Anordnung noch immer vorhanden. Die Versuche aber haben gezeigt, dass für die in der Praxis vorwiegend in Betracht

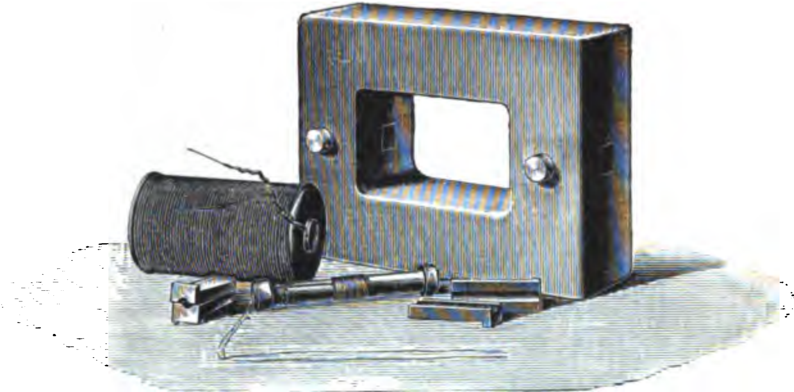


Fig. 200. Bestandteile des Apparates zur Verwendung der Jochmethode.

kommenden Materialien von hoher Permeabilität der hierdurch entstehende Fehler vernachlässigt oder durch Scheerung der Kurven (vergl. S. 306) beseitigt werden kann.

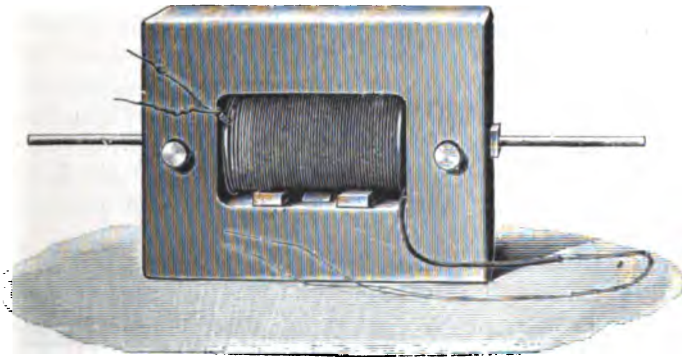


Fig. 201. Apparat der Physikalisch Technischen Reichsanstalt zur Anwendung der Jochmethode.

Die magnetisierende Spule wird mit einer Stromquelle und einem Ampèremeter, die Sekundärspule mit einem ballistischen Galvanometer verbunden.

7. Hopkinson's Apparat zur Messung der Permeabilität des Eisens.

Der von Hopkinson getroffenen Einrichtung liegt der Gedanke zugrunde, die Kraftlinien, welche durch die magnetisierende Spule BB (vergl. Fig. 202) erzeugt werden, thunlichst vollständig in Eisen verlaufen zu lassen und der Bildung magnetischer Pole vorzubeugen, die störend auf die magnetische Induktion einwirken würden. — Aus der zu untersuchenden Eisensorte werden zwei cylindrische Stäbe C und C′ hergestellt; diese stossen links von D mit gut abgeschliffenen Enden aneinander und füllen zwei cylindrische Löcher aus, die sich in einem massiven, aus weichstem Schmiedeeisen hergestellten Stücke AA befinden. Der Hohlraum dieses Eisenstückes AA

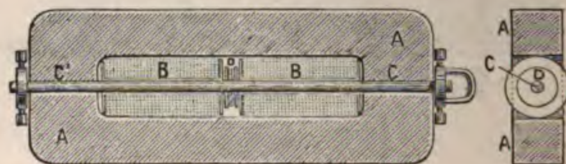


Fig. 202. Hopkinson's Apparat zur Messung der Permeabilität.

nimmt auch die magnetisierende Spule BB auf. In den zwischen den beiden magnetisierenden Spiralen BB befindlichen Raum ist um den längeren Bolzen C eine Induktionsspirale D gelegt, die durch biegsame Drähte mit einem ballistischen Galvanometer in Verbindung steht und an einem gespannten Gummifaden hängt. Zieht man an der rechts befindlichen Handhabe den längeren Eisenstab C ein Stück zurück, so verliert die Sekundärspule ihren Halt innerhalb des Apparates und wird durch die Gummischnur in die Höhe geschnellt. Durch das Verschwinden der Kraftlinien, die vorher durch das Eisen C′ und die Spule D hindurchgingen, entsteht ein Induktionsstrom, der durch den Ausschlag des ballistischen Galvanometers gemessen wird.

Die magnetomotorische Kraft (vergl. Kap. VI, Abschn. 5, S. 130), welche durch die n Windungen der Spulen BB erzeugt wird, wenn ein Strom von der Stärke i durch diese Windungen hindurchfliesst, ist

$$\mathfrak{H} = \frac{4 \pi n i}{10 l}.$$

Bezeichnet man nun mit μ die zu bestimmende magnetische Permeabilität der Eisensorte, aus der die Bolzen C und C′ hergestellt worden sind, mit l die Länge der Kraftlinien in dem aus dem Eisenkörper A innen frei herausragenden Stücke dieser Bolzen, mit Q den Querschnitt derselben, und bezeichnet ferner μ' die Permeabilität des Materials

des Eisenkörpers AA, Q' den Querschnitt und l' die mittlere Weglänge der Kraftlinien in demselben, so ist (nach Kap. VI, Abschn. 7, S. 134):

$$\frac{4\pi n i}{10} = \frac{\Phi \cdot l}{\mu \cdot Q} + \frac{\Phi \cdot l'}{\mu' \cdot Q'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

oder, da Q' im Verhältnis zu Q sehr gross ist, näherungsweise:

$$\frac{4\pi n i}{10} = \frac{\Phi l}{\mu \cdot Q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Bezeichnet nun n_1 die Anzahl der Windungen der Induktionsspirale D, R den Gesamtwiderstand dieser Spule und des ballistischen Galvanometers, ferner α den Ausschlagswinkel der Nadel dieses Galvanometers, so ist (vergl. Gleich. 5, S. 309):

$$\frac{\Phi \cdot n_1}{R} = k \cdot \sin \frac{1}{2} \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

Aus dieser letzten Gleichung wird Φ bestimmt; durch Einsetzen dieses Wertes in die vorhergehende Gleichung 12) findet man μ.

Durch Veränderung der Stromstärke i, die mit Hilfe eines Ampèremeters gemessen wird, findet man die zu verschiedenen magnetomotorischen Kräften $4\pi n i$ zugehörigen Werte von μ.

Man sieht leicht ein, dass diese Methode nur Näherungswerte liefern kann und daher lediglich zur Vergleichung verschiedener Eisensorten geeignet ist. Die Kraftlinien müssen mehrmals dünne Luftzwischenräume durchschneiden; es ist streng genommen nicht zulässig, das zweite Glied der Gleichung 11) zu vernachlässigen. Durch an den sich berührenden Enden der Stäbe auftretenden freien Magnetismus wird der Verlauf der Kraftlinien gerade in der Spule gestört.

Ohne Anwendung einer Scheerung kann daher diese Methode nicht verwendet werden.

8. Der Apparat für magnetische Untersuchungen von Siemens & Halske.[1]

Einen für technische Zwecke geeigneten und in seiner Anwendung sehr einfachen Apparat haben Siemens & Halske durch ihren Ingenieur Herrn Dr. A. Koepsel konstruieren lassen; dieses Instrument gestattet, nach der Schlussjochmethode, mit einer für die Praxis genügenden Gnauigkeit die Grösse der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}$, welche durch eine bekannte magnetisierende Kraft in einer Eisenprobe von vorgeschriebener Gestalt erzeugt wird, unmittelbar an einer Skala abzulesen.

---

[1]) Man vergleiche: Nachrichten von Siemens & Halske A.-G., Jahrgang 1898, No. 26.

Zwischen zwei Körpern J J aus weichem Eisen (vergl. Fig. 203) befindet sich bei A ein ebenfalls aus weichem Eisen hergestellter massiver Cylinder C. Dieser Cylinder C besitzt einen nur 2 *mm* kleineren Durchmesser als die Ausbohrung der ihn fast vollkommen umfassenden Polschuhe der Stücke J J. In dem hierdurch entstandenen Luftzwischenraum von 1 *mm* Dicke ist die zwischen Spitzen gelagerte Spule S drehbar angeordnet.[1]) Diese Spule wird durch Palladiumfedern, die gleichzeitig zur Zu- und Abführung eines schwachen Stromes (von ungefähr 0,01 Amp. Stärke) dienen, so

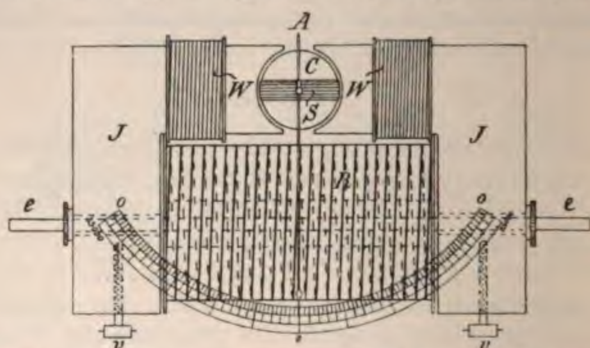


Fig. 203. Koepsels Apparat für magnetische Materialprüfungen.

lange in die Richtung der Kraftlinien eingestellt, als kein Strom durch diese Spule fliesst. Mit der Spule S ist ein leichter Zeiger verbunden, der über einer Skala spielt. Cylindrische Löcher o o in den Eisenstücken J J dienen zur Aufnahme des genau in diese Öffnungen passenden Probestückes. Dieses Probestück e e ist in dem Raume zwischen den Stücken J J von der Magnetisierungsspule R vollkommen umgeben, und die Windungszahl und Grösse der Spule ist so gewählt, dass man die magnetisierende Kraft ohne weiteres durch Multiplikation der Stromstärke (in Ampère) mit 100 erhält.

Um die Wirkung der Magnetisierungsspule auf das Joch J J aufzuheben, sind die Polschuhe noch mit Wickelungen W W umgeben, die der Spule R entgegenwirken und mit ihr in Hintereinanderschaltung verbunden sind.

Von der zu untersuchenden Eisensorte stellt man sich zunächst ein Probestück von vorgeschriebener Länge und Dicke her, schiebt dies in die Öffnung o o ein und befestigt es mit den Schrauben v v. Hierauf sendet man durch die Windungen R einen magnetisierenden

[1]) Ähnlich wie dies bei dem auf S. 209 beschriebenen Präzisionsspannungsmessern von Weston, Siemens & Halske und Anderen geschieht.

Strom und misst dessen Stärke durch ein Ampèremeter. Durch die Windungen S schickt man einen Strom von genau vorgeschriebener Stärke. Die Windungen S erfahren nunmehr in dem entstandenen Magnetfelde eine um so stärkere elektrodynamische Ablenkung, je stärker das erzeugte Feld ist. Die Grösse der Ablenkung hängt daher unmittelbar von der Anzahl der Kraftlinien ab, die durch den zwischen den Eisenkörpern J J liegenden Teil des Probestückes e e hindurch gehen. Die Skala ist durch vorgängige Versuche mit einem ballistischen Galvanometer in der Fabrik derart geaicht, dass man aus der Zeigerstellung unmittelbar die magnetische Induktion 𝔅 in absoluten Einheiten abzulesen imstande ist.

Fig. 204 zeigt den Magnetisierungsapparat in seiner neuen Gestalt nach Entfernung der Schutzhülle und Skala.

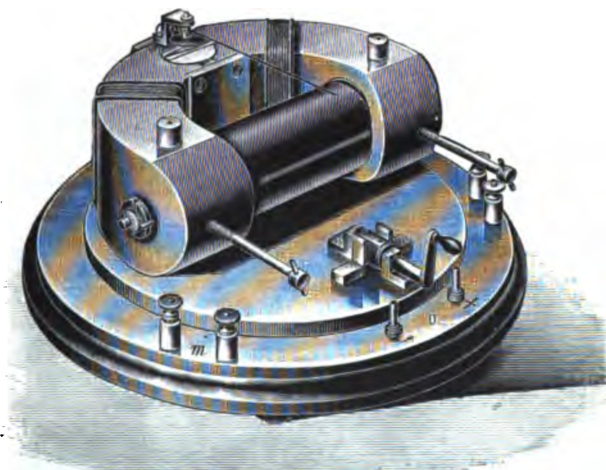


Fig. 204. Apparat für magnetische Untersuchungen von Siemens & Halske.

In Fig. 205 ist das Schema der Magnetisierungsschaltung dargestellt. A ist der Magnetisierungsapparat, W_m ein Kurbelwiderstand zur Einstellung des magnetischen Feldes $\mathfrak{H}$ durch Änderung der Stärke des magnetisierenden Stromes. Der Dreikurbelwiderstand W_h dient zur genauen Einstellung des Hilfsstromes, der die bewegliche Spule durchfliesst. Eine Kurbel dient zur groben, die andere zur mittleren, die linke zur Feinregelung der Stromstärke. — Bei B wird für Messungen an weichem Eisen für Feldstärken bis $\mathfrak{H} = 150$ *cm* g sek Einheiten eine 4 Voltbatterie E und bei Messungen an gehärtetem Stahl für Feldstärken bis $\mathfrak{H} = 300$ *cm* g sek eine 8 Voltbatterie eingeschaltet.

Magnetisierungs- und Hilfsstrom werden durch ein einohmiges Präzisions-Millivolt- und Ampèremeter unter Benutzung geeigneter Nebenschlusswiderstände besonders gemessen.

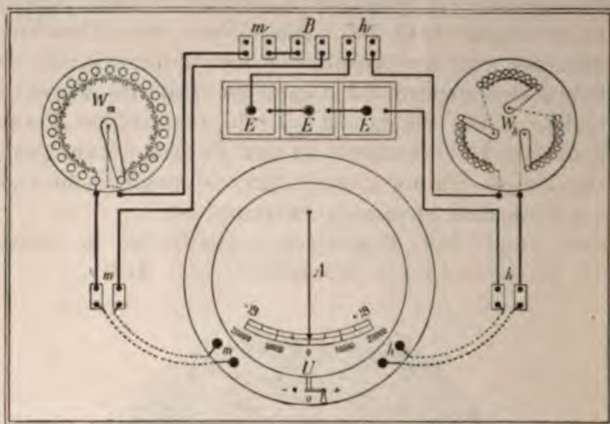


Fig. 205. Schaltung des Apparates für magnetische Untersuchungen von Siemens & Halske.

Am Millivoltmeter liest man direkt die Feldstärkewerte $\mathfrak{H}$, am Zeiger des Apparates die Werte $\mathfrak{B}$ ab.

Bei Benutzung dieses handlichen Apparates wird der Hilfsstrom nach der Gleichung

$$\text{Hilfsstrom} = \frac{\text{Konstante}}{\text{Querschnitt des Prüfstabes}}$$

eingestellt.

9. Methode von Rowland.

Eines ähnlichen Apparates, wie in Fig. 199 abgebildet war, bedient sich Rowland. Er verwendet jedoch einen ungeteilten Eisenstab C (vergl. Fig. 206), wickelt auf diesen direkt die Induktionsspule D und bringt den mit der Induktionsspule umgebenen Eisenstab

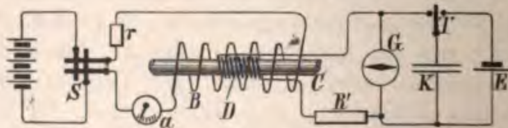


Fig. 206. Apparat für magnetische Untersuchungen nach Rowland.

in das Innere der magnetisierenden Spule B. Die Stärke des Stromes, der durch B fliesst, misst er durch ein Ampèremeter a, und verändert die Stromstärke durch den Regulierwiderstand r. Durch einen Stromwender S kehrt er die Stromrichtung um und

misst die Stärke des erzeugten Induktionsstromes an dem ballistischen Galvanometer G, dem zur Minderung der Ausschläge ein induktionsfreier Widerstand R′ vorgeschaltet ist. Durch den Schlüssel T kann man nach jedem Versuche den Kondensator K durch die Batterie E laden und hierauf durch das Galvanometer G entladen und sich auf diese Weise überzeugen, dass der Reduktionsfaktor k des Galvanometers unverändert geblieben ist.

Wenn der magnetisierende Strom durch den Stromwender S umgekehrt wird, ändert sich die Zahl der Kraftlinien um 2 Φ. Man hat, wenn α der Ausschlag am ballistischen Galvanometer ist:

$$\frac{2\,\Phi \cdot n_1}{R} = k \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \quad \ldots\ldots \quad 14)$$

Hieraus findet man Φ. Führt man dies in die Gleichung 12

$$\frac{4\pi n i}{10} = \frac{\Phi \cdot l}{\mu \cdot q}$$

ein, so kann man die Permeabilität μ hieraus bestimmen.

Es ist ohne weiteres klar, dass man nach dieser Methode nicht die Hysteresiskurve, sondern nur die Kommutierungskurve einer Eisensorte bestimmen kann. (Vergl. Kap. V, Abschn. 18, S. 123.)

10. Die magnetische Wage von Du Bois.

Bei diesem Apparate wird die Zugkraftmethode angewendet. Die berechtigten Einwendungen, welche man sonst dagegen erheben kann, die magnetische Zugkraft zur Messung der magnetischen Eigenschaften der Eisensorten zu verwenden, sind in glücklicher Weise dadurch umgangen, dass bei diesem Apparate keine ferromagnetischen Teile sich direkt berühren, sondern nur eine mit konischem Ende versehene Schraube (J in Fig. 207) aus äusserst schwach magnetischem und doch hartem Manganstahl von einer ebenen Fläche abgerissen wird.

Die Du Bois'sche Wage besteht (vergl. Fig. 207) aus zwei auf einem Grundbrett befestigten Backen V_1 und V_2 aus weichem Eisen. Der Probestab a ist von der magnetisierenden Spule C umgeben und wird zwischen die Backen V_1 und V_2 mit eben abgeschliffenen Flächen eingelegt und durch eine Pressschraube festgehalten.

Über den weichen Eisenbacken schwebt, um eine Schneide E drehbar, ein halbkreisförmiges Joch YY aus weichem Eisen. Die beiden Luftschlitze zwischen den Endflächen des Joches und den Oberflächen der Backen V_1 und V_2 betragen nur je $^1/_4$ *mm*.

Wenn man nun durch die Magnetisierungsspule C einen Strom schickt, entstehen, weil die gleichen magnetischen Anziehungskräfte an ungleich langen Hebelarmen wirken, Drehungsmomente.

Genaue vergleichende Versuche mit anderen Methoden haben gezeigt, dass diese Drehungsmomente dem Quadrate des magnetischen Induktionsflusses in der Mitte des Probestabes ziemlich genau proportional sind.

Dieses Drehungsmoment zieht den Wagebalken auf der linken Seite nach V_1 herunter; ihm entgegen wirkt das Gewicht P; eine vollständige Berührung der gegenüberstehenden Endflächen des Joches und des Backens V_1 wird durch die Anschlagschraube J gehindert. Zur Überwindung der magnetischen Anziehungskraft dienen die Laufgewichte W_{100} und W_4, die sich auf der quadratisch geteilten, am Joch befestigten Laufschiene S S verschieben lassen. Man sucht diejenige Einstellung der Laufgewichte, bei der gerade der Wagebalken von der Schraube J abreisst.

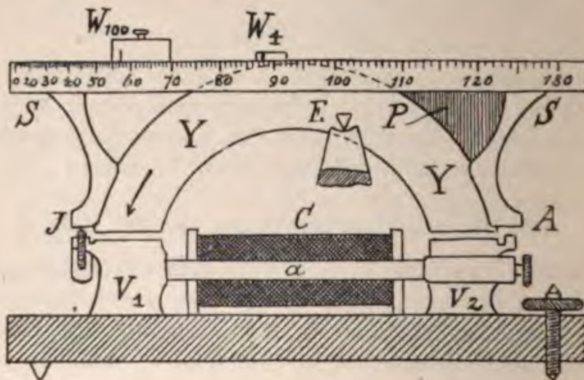


Fig. 207. Magnetische Wage von Du Bois.

Das Instrument wird so eingerichtet, dass man für Stäbe von 0,5 *qcm* Querschnitt (und nur für diese passt die Aichung) an der Skala gerade die Werte von $\mathfrak{B}$ abliest. Die angewendete Feldintensität $\mathfrak{H}$ ergiebt sich durch Multiplikation der die Spule C durchfliessenden Stromstärke mit 100.

An beiden Luftschlitzen bilden sich selbstverständlich Pole aus, deshalb ist, wenigstens für absolute Bestimmungen, eine Scheerung (vergl. S. 305) der erhaltenen Magnetisierungskurven unbedingt nötig. Die Scheerungskurven werden mit Hilfe eines Normalprüfungsstabes erhalten, der jedem Apparate beigegeben wird. Die Magnetisierungskurve dieses Stabes wird vorher nach einer absoluten Methode bestimmt.

Da der Apparat keine Rechnung und wenig Hilfsapparate erfordert, so ist er für die Praxis, der relative Bestimmungen meist völlig genügen, vielfach in Gebrauch.

Fig. 208 zeigt die Anordnung, die neuerdings von Siemens & Halske dem Apparate gegeben worden ist.

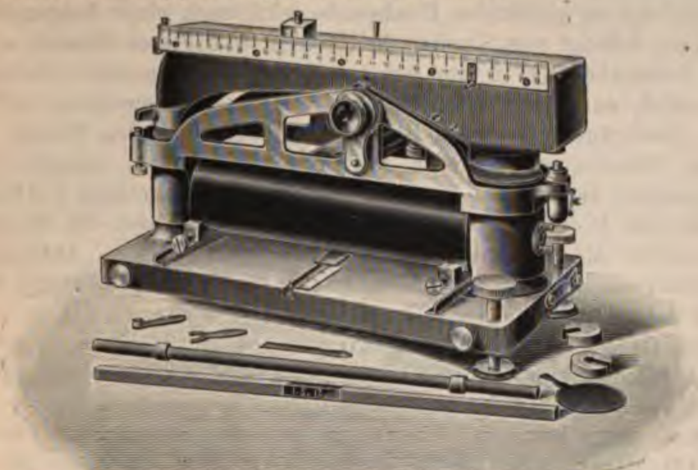


Fig. 208. Neuere Ausführung der magnetischen Wage von Du Bois.

11. Ewings Apparat zur Messung der Hysteresis.

Es sind noch eine grosse Zahl anderer Methoden und Instrumente zur Messung der magnetischen Eigenschaften des Eisens vorgeschlagen worden, keine derselben hat sich jedoch in ähnlicher Weise in die Praxis einführen können, wie dies mit den beschriebenen der Fall gewesen ist.

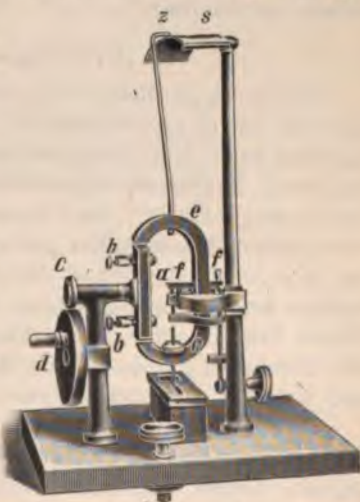


Fig. 209. Ewings Apparat zur Messung der Hysteresis.

In unmittelbarem Zusammenhange mit diesen erörterten magnetischen Untersuchungen stehen jedoch noch einige andere, die wir in den folgenden beiden Abschnitten erledigen wollen.

Von besonderer Wichtigkeit ist der Apparat, den Ewing konstruiert hat, um den Hysteresisverlust von Transformatorblechen bei einem bestimmten Werte der magnetischen Induktion unmittelbar zu messen. (Vergl. Fig. 209.)

Die Einrichtung des Instrumentes beruht auf dem Gedanken, die Arbeit zu bestimmen, welche

durch Umkehrung des Magnetismus in den zu untersuchenden Blechproben verbraucht wird.

Aus der zu prüfenden Blechprobe wird nach einer beigegebenen Lehre ein Bündel von Streifen hergestellt, und dieses Bündel a wird durch Schrauben b b in eine Art von Rahmen eingepresst. Durch ein Triebrad d, das durch eine Friktionsrolle o seine Bewegung auf eine Achse überträgt, wird das Blechbündel zwischen den Polen eines starken Dauermagneten e in rasche Umdrehungen versetzt. Der Dauermagnet ist wie ein Wagebalken um zwei Schneiden f drehbar.

Bei der Rotation des Blechbündels vor den Polen des Magneten wechselt der Magnetismus rasch in den Blechstreifen. Infolge der Hysteresis entsteht in dem Dauermagneten ein Drehungsmoment, durch das er aus seiner vertikalen Lage abgelenkt wird.

Die Grösse der Ablenkung wird an einem Zeiger z abgelesen, der auf einer Skala s spielt. Die Ablenkung ist um so grösser, je höhere Werte die Hysteresis besitzt.

Man vergleicht die Ablenkung mit der eines Probebündels, dessen Hysteresis aus Untersuchungen nach einer absoluten Methode genau bekannt ist.

Der Apparat liefert nur relative Werte, auch gelten dieselben nur für einen bestimmten Induktionswert, der durch die Stärke des Dauermagneten bedingt ist.

Zur Vergleichung von Transformatorblechen ist der Apparat jedoch verwendbar.

12. Hysteresismesser von Blondel.

Auf einem ähnlichen Gedanken, wie der Apparat von Ewing, beruht das von Blondel konstruierte, zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Eisenblechsorten dienende Instrument. (Vergl. Fig. 210.) Bei diesem Apparat dreht sich der permanente Magnet oder Elektromagnet MM. Die Probestücke erhalten Ringform und werden durch einen Messinghalter getragen, der mit thunlichst wenig Reibung um eine vertikale Achse drehbar ist. Die Ringe müssen 38 *mm* inneren und 55 *mm* äusseren Radius haben, und man legt so viele Bleche übereinander, dass ihre Dicke gerade 4 *mm* beträgt. Nach der Herstellung müssen die Ringe nochmals sorgfältig ausgeglüht und langsam abgekühlt werden.

Man dreht die Handhabe mit zwei bis drei Umdrehungen in 1 Sekunde. Das Probestück strebt der Drehung des Magneten zu folgen. Durch Zusammendrehen einer elastischen Torsionsfeder f wird aber bald eine bestimmte Stellung der Probestücke erhalten.

Dem magnetischen Drehungsmomente wird dann gerade durch die elastische Kraft der Torsionsfeder das Gleichgewicht gehalten.

r Winkel, um den die Feder zusammengedreht worden ist, n einer Skala abgelesen werden.

: m das Drehungsmoment, das von dem Drehfeld auf den usgeübt wird, A der Hysteresisverlust, und $\sim$ die Perioden- 1 Sekunde, so wird:

$$\frac{\sim A}{2\pi \sim} = m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

ılso unabhängig von der Drehgeschwindigkeit, mit der man ıgneten M bewegt.

r Magnet ist so gewählt, dass ungefähr $\mathfrak{B} = 10000$ im Probe- wird. Ist M ein Elektromagnet, so kann dieser mit ver- ner Stromstärke erregt und $\mathfrak{B}$ geändert werden.

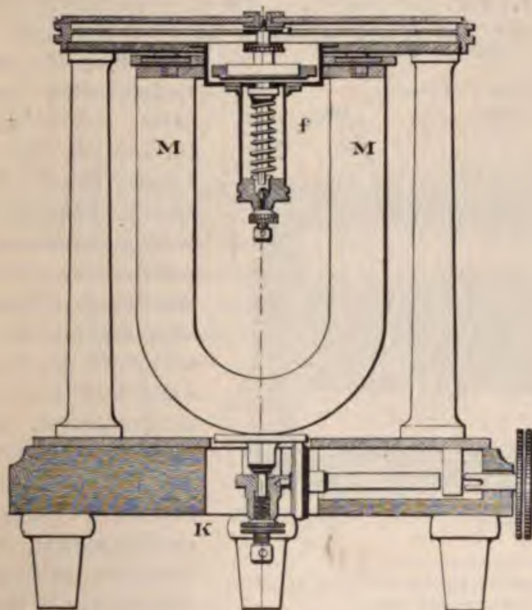


Fig. 210. Hysteresismesser von Blondel-Carpentier.

empfiehlt sich, einmal nach einer Seite, dann nach der ent- esetzten zu drehen und aus den so erhaltenen Ablesungen das :u nehmen.

n absolute Werte zu erhalten, braucht man nur einen der nit einer Wickelung zu versehen und kann ihn dann nach der schen Methode untersuchen.

genügt, die Ablesungen am Apparate mit einem konstanten zu multiplizieren, den man aus solchem Vergleich ermittelt

hat, um den Energieverlust im Kubikcentimeter Eisen in Erg unmittelbar aus der Ablenkung zu bestimmen.

Fig. 210 zeigt den Apparat in der Form, die ihm Carpentier gegeben hat.

13. Messung der magnetischen Streuung.

Sehr häufig hat der Elektrotechniker den Wunsch, die magnetische Streuung einer Dynamomaschine experimentell zu bestimmen, d. h. zu ermitteln, welcher Bruchteil der in den Feldmagneten erzeugten Kraftlinien wirklich durch das Ankereisen hindurchgeht und in den Ankerwindungen Induktionswirkungen hervorbringt.

Auch für diese Messungen bedient man sich des ballistischen Galvanometers. Fig. 211 zeigt z. B. die Anordnung der induzierenden Windungen für die Untersuchung einer zweipoligen Lahmeyermaschine; für jedes andere Modell wird man danach leicht durch geringe Abänderungen die passenden Lagen dieser Spulen ermitteln können. Eine Induktionsspule a a, die aus einer oder nur wenigen Windungen besteht, legt man um den Anker A und verbindet die Enden dieser Spule mit dem ballistischen Galvanometer. (Die Durchschnitte dieser den Anker von hinten nach vorn umfassenden Spule sind durch zwei diametral, vertikal übereinander stehende schwarze Punkte a a in der Figur angedeutet.)

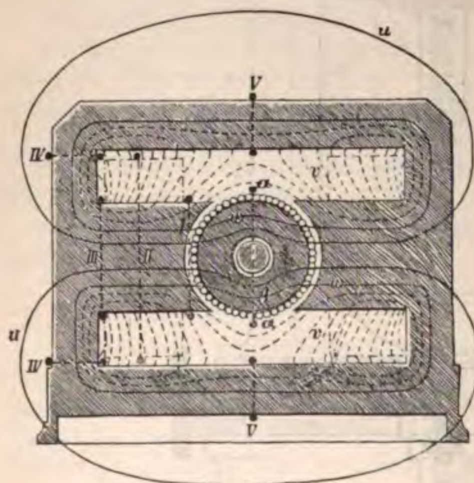


Fig. 211. Bestimmung der Streuung einer Dynamomaschine.

Hierauf sendet man einen zur Magnetisierung der Feldmagnete dienenden Strom von passender Stärke durch deren Windungen und beobachtet den am Galvanometer entstehenden Ausschlag, oder man unterbricht den magnetisierenden Strom oder kehrt ihn um.

Ebenso legt man Induktionsspulen an den Stellen I, II, III, IV, V um das Eisen oder um die Spulen der Feldmagnete und beobachtet unter genau denselben Verhältnissen wie vorher (also bei gleicher Stärke des magnetisierenden Stromes, etwa ebenfalls bei Unterbrechung desselben) die Induktionswirkung am ballistischen Galvanometer.

Aus der Formel: $\frac{\Phi \cdot n_1}{R} = k \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$,

in der n_1 die Anzahl der Windungen der Induktionsspirale, R den Widerstand des Stromkreises des ballistischen Galvanometers und α den ersten Ausschlag bedeutet, wird die Anzahl Φ der Kraftlinien bestimmt, die durch den von den Windungen umfassten Querschnitt hindurchgehen.

Beispiel: Bei der in Fig. 212 dargestellten Lahmeyer-Maschine haben n_1 und R für alle Fälle den gleichen Wert; demnach stehen die Grössen $k \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$ unmittelbar im Verhältnis der Zahlen der Kraftlinien, die durch die einzelnen Querschnitte hindurchgehen. Nachstehende Tabelle giebt ein Bild der Streuungsverhältnisse:

Bezeichnung der Windung:	I	II	III	IV	V	aa
$k \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$	788,5	861	876	850	749	730
Kraftlinienzahl in Prozenten des Querschnittes III	89,9	98,4	100	97,0	85,5	89,1
Streuung in Prozent	10,1	1,6	—	3,0	14,5	10,9.

Man erkennt hieraus, dass nur 11% von den erzeugten Kraftlinien nicht durch den Anker hindurch, sondern durch Streuung verloren gehen und dass die am hinteren Ende der Erregungsspule gelegene Windung III, wie zu erwarten, die grösste Menge Kraftlinien umschliesst.

In der Figur sind die ausgenützten Kraftlinien mit u, die Kraftlinien, die nicht durch den Anker hindurchgehen, mit v bezeichnet. Die Spulen der Feldmagnete sind durch punktierte Rechtecke angedeutet.

XVI. Kapitel.

Die Messung der Induktions-Koëffizienten.

1. Bestimmung der Selbstinduktion aus dem scheinbaren Widerstande. Methode von Joubert.

Will man den Selbstinduktions-Koëffizienten einer Vorrichtung ermitteln, so bestimmt man zunächst auf gewöhnliche Weise mit Hilfe einer Wheatstone'schen Brücke unter Anwendung von Gleichstrom und eines Galvanometers den Leitungswiderstand (vergl. Kap. XIII, Abschn. 2, S. 266 ff.). Der so gefundene Widerstand mag R sein.

Hierauf erzeugt man durch eine Wechselstrommaschine, deren Wechselzahl genau bekannt ist, oder durch ein Unterbrechungsrad, mit dem man eine Induktionsrolle verbindet, oder durch eine Stimmgabel, die man als Unterbrecher für den primären Stromkreis eines Induktionsapparates verwendet, einen Wechselstrom von möglichst sinoidalem Verlauf, dessen Wechselzahl $\sim$ genau bekannt ist. An Stelle der Batterie bei der Wheatstone'schen Brücke verwendet man diesen Wechselstromapparat; das Galvanometer ersetzt man durch ein empfindliches Elektrodynamometer (vergl. Kap. VI, Abschn. 6, S. 157) für schwache Ströme, und misst nunmehr an der Wheatstone-schen Brücke nochmals den scheinbaren Widerstand R'. Nun ist aber (nach dem, was auf S. 174, Gleich. 15, mitgeteilt worden ist):

$$R' = \sqrt{R^2 + (2 \sim \pi L)^2} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

Wenn man R' und R gefunden hat, kann man hieraus den Koëffizienten der Selbstinduktion L ohne Schwierigkeit berechnen.

Vorausgesetzt wird hierbei, dass auch die Vergleichswiderstände, die in der Messbrücke benutzt werden, keine merkliche Selbstinduktion besitzen.

Wenn ein Spannungsmesser für Wechselströme zur Verfügung steht, etwa ein Hitzdraht-Voltmeter oder ein Quadrantelektrometer, so kann man den Selbstinduktions-Koëffizienten messen, wenn man die Wechselzahl $\sim$ des den Apparat durchfliessenden Wechselstromes genau kennt.

Die Wechselzahl $\sim$ kann aus der Umdrehungszahl des Ankers einer Wechselstrommaschine und der Zahl der vorhandenen Pole

oder Induktionsspulen dieses Ankers leicht ermittelt werden. Ist z. B. U die Umdrehungszahl des Ankers in einer Minute und p die Zahl der vorhandenen Magnetpole, an welchen bei jeder Umdrehung die Induktionsspulen vorüber gehen, so ist $\frac{U \cdot p}{60} = 2 \sim$ die Zahl der Stromwechsel in einer Sekunde.

Zunächst wird mit Hilfe der Wheatstone'schen Brücke ein induktionsfreier Widerstand von der Grösse des Widerstandes des Apparates, für den der Koëffizient der Selbstinduktion ermittelt werden soll, hergestellt, gleichzeitig wird mit Gleichstrom die Grösse r jedes dieser Widerstände in Ohm gemessen.

Dann lässt man einen Wechselstrom von passender Stärke und bekannter Wechselzahl durch den Apparat mit Selbstinduktion und den induktionslosen Widerstand in Hintereinanderschaltung hindurchgehen. Nunmehr misst man mit einem Spannungsmesser für Wechselstrom den Spannungsunterschied e_1 an den Klemmen des Apparates mit Selbstinduktion und den Spannungsunterschied e_0 an den Enden des induktionsfreien Widerstandes von gleicher Grösse.

Bezeichnet man mit i die unbekannte Stromstärke des Wechselstromes, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze:

$$e_0 = i \cdot r_0 \text{ und } e_1 = i \cdot r_1,$$

wenn r_1 den scheinbaren Widerstand des Apparates mit Selbstinduktion bei der Wechselzahl $\sim$ bedeutet. Da nun nach Gleichung 1)

$$r_1^2 = r_0^2 + (2\pi \sim L)^2$$

ist, so wird:

$$\frac{r_1^2}{r_0^2} = 1 + \frac{4\pi^2 \sim^2}{r_0^2} L^2, \text{ oder } \frac{e_1^2}{e_0^2} = 1 + \frac{4\pi^2 \sim^2}{r_0^2} L^2.$$

Dann ist:

$$L = \frac{r_0}{2 \sim \pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{e_1}{e_0}\right)^2 - 1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

Stehen Strommesser und Spannungsmesser zur Verfügung, die bei der herrschenden Wechselzahl Stromstärke und Spannung richtig zu messen gestatten, so sendet man durch den Apparat, dessen Selbstinduktions-Koëffizient gefunden werden soll, einen Wechselstrom von bekannter Wechselzahl und misst die Stromstärke i, sowie den Spannungsunterschied e an den Klemmen des Apparates.

Alsdann ist:

$$i = \frac{e}{\sqrt{r_0^2 + 4\pi^2 \sim^2 L^2}}$$

und somit:

$$L = \frac{1}{2\pi \sim} \cdot \sqrt{\frac{e^2}{i^2} - r_0^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

In der Praxis bedient man sich vorzugsweise der Joubert'schen Methode, weil man die erforderlichen Hilfsmittel meist zur Hand hat, und die Vorrichtung unter nahezu denselben Bedingungen untersucht werden kann, unter welchen man den Selbstinduktions-Koëffizienten zu kennen wünscht.

2. Methode von Lord Rayleigh.

Die Vorrichtung, deren Selbstinduktions-Koëffizient L bestimmt werden soll, wird in den vierten Zweig (B C in Fig. 8, S. 23) einer Wheatstone'schen Brücke eingeschaltet, deren übrige drei Seiten durch bekannte induktionsfreie Widerstände gebildet werden. Man stellt nun zunächst, indem man eine Batterie als Stromquelle und ein ballistisches Galvanometer benutzt, Gleichgewicht her, sodass durch das Galvanometer kein Strom fliesst.

Hierauf schliesst man zunächst nur den Stromkreis des Galvanometers und dann erst den der Batterie. Infolge der Selbstinduktion entsteht ein kurz dauernder Induktionsstrom, der die Nadel des ballistischen Galvanometers veranlasst, bis zu einem Winkel α auszuschlagen.

Ist nun k die ballistische Konstante des Galvanometers, so ist die Elektrizitätsmenge q, die durch das Galvanometer geflossen ist:

$$q = k \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Nunmehr stört man das für Gleichstrom hergestellte Gleichgewicht der Brücke dadurch, dass man ausser der Vorrichtung, deren Selbstinduktion gemessen werden soll, noch einen ganz kleinen, aber seiner Grösse nach bekannten induktionsfreien Widerstand ϱ in den vierten Zweig der Brücke einschaltet. Das Galvanometer giebt nunmehr einen kleinen dauernden Ausschlag δ, andeutend, dass ein Strom $i = K \cdot \delta$ durch das Instrument fliesst, wenn mit K der Reduktionsfaktor desselben bezeichnet wird.[1])

Der gesuchte Koëffizient der Selbstinduktion L ist dann sehr nahe:

$$L = \varrho \cdot \frac{k}{K} \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\delta} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4)$$

Die Grössen k und K müssen durch vorhergehende Aichungen bestimmt werden.

Die Einheit, in der man L ausgedrückt erhält, ist der Erdquadrant (10^9 *cm*, vergl. Kap. IX, Abschn. 6, S. 187) oder Henry.

---

[1]) K ist diejenige Zahl, mit der δ multipliziert werden muss, wenn man die Stromstärke in Ampère haben will.

3. Messung der Selbstinduktion durch eine bekannte Kapazität. Methode von Vaschy.

In einer Wheatstone'schen Brücke bestehen drei Zweige (in der Fig. 212, a, b und s) aus induktionsfreien Widerständen. Im vierten Zweig schaltet man den Apparat r, dessen Selbstinduktion L gefunden werden soll, hinter einen induktionsfreien Widerstand von der bekannten Grösse r'. In einen Nebenschluss zu diesem Widerstand r' schaltet man einen Kondensator von bekannter Kapazität C.

Fig. 212. Bestimmung des Selbstinduktions-Koëffizienten nach Vaschy.

Zunächst stellt man Stromlosigkeit des Elektrodynamometers für Gleichstrom her. Hierauf stellt man für Wechselstrom, den man an Stelle des Gleichstromes verwendet, aufs neue Gleichgewicht her, indem man die Punkte ändert, an welchen man an r' den von Selbstinduktion freien Widerstand, den Kondensator C anschliesst.

Ist nun R der Widerstand des Teiles von r', zu dem der Kondensator parallel geschaltet werden muss, damit auch für den Fall, dass man Wechselstrom verwendet, das Elektrodynamometer G in Ruhe bleibt, so hebt nunmehr die Wirkung des Kondensators gerade die Wirkung der Selbstinduktion auf, und dies findet statt, wenn:

$$L = R^2 \cdot C \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

ist.

Man kann auch statt des Elektrodynamometers ein Galvanometer G benutzen und findet dieselben Verhältnisse, wenn man die Abzweigungspunkte des Kondensators solange ändert, bis die Galvanometernadel sowohl beim Öffnen als beim Schliessen des Stromes durch den Ausschalter A ihre Stellung unverändert beibehält.

4. Ayrton und Perry's Secohmmeter[1]) und Induktionsnormale.

Auch diese Methode zur Messung von Selbstinduktions-Koëffizienten beruht auf der Anwendung der Wheatstone'schen Brücke. Sind a, b, c, d die vier Zweige der Brückenschaltung, so wird in a ein Apparat eingeschaltet, der gestattet, veränderliche, aber bekannte Induktionswerte einzustellen; den Zweig c bildet die Vorrichtung,

[1]) Secohmmeter ist eine der in England so beliebten Abkürzungen von Sekunden-Ohmmeter, weil das Instrument anfänglich für absolute Bestimmungen des Induktions-Koëffizienten aus Zeit und Widerstand hergestellt worden war. Jetzt wird der Apparat nur noch zu Vergleichungen verwendet.

deren Selbstinduktions-Koëffizient bestimmt werden soll; als Zweige b und d dienen bekannte, veränderliche, völlig induktionsfreie Drahtwiderstände. (Vergl. Fig. 213.)

Sowohl in den Batteriestromkreis, als in den Galvanometerstromkreis der Wheatstone'schen Brücke ist je ein rotierender Kommutator mit je zwei Bürsten eingeschaltet. — Diese beiden Kommutatoren R und B in Fig. 213 sind auf einer gemeinsamen Drehachse montiert; ihre gegenseitige Stellung aber kann beliebig geändert werden.

Durch eine Kurbel und passende Wechselräder kann die Geschwindigkeit, mit der die Kommutatorachse gedreht wird, so geregelt werden, dass zwischen 5 bis 100 Stromwechsel in der Sekunde erfolgen. Zunächst wird bei ruhendem Kommutator mit Gleichstrom, den die Batterie P liefert, Gleichgewicht hergestellt, d. h. die veränderlichen Widerstände in b und d werden so abgeglichen, dass am Galvanometer G kein Ausschlag wahrzunehmen ist.

Nunmehr setzt man die Kommutatorachse in Umdrehung; dadurch wird

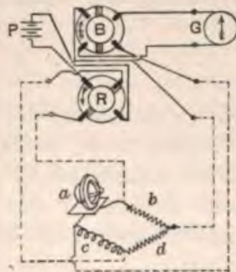
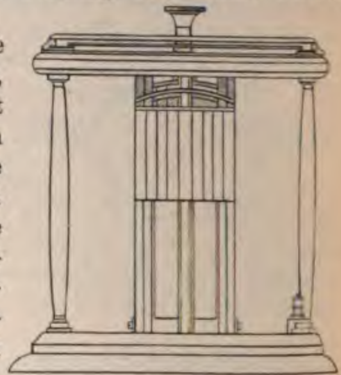
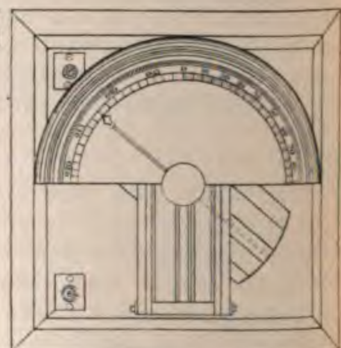


Fig. 213. Schaltung von Ayrton und Perry's Secohmmeter.




Fig. 214. Verstellbare Induktionsnormale von Ayrton und Perry.

der Batteriestromkreis abwechselnd geschlossen und geöffnet; gleichzeitig wird durch den anderen Kommutator das Galvanometer abwechselnd beim Stromschluss an die Brücke angelegt, unmittelbar darauf kurz geschlossen und, während der Öffnungsstrom die Zweige durchläuft, im entgegengesetzten Sinne an die Brücke angeschaltet.

Man verstellt nunmehr die veränderliche Induktionsnormale (vergl. Fig. 214) solange, bis auch bei rotierendem Kommutator das Galvanometer in Ruhe bleibt.

Es gilt dann die Proportion:

$$\frac{L_c}{L_a} = \frac{w_d}{w_b} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

wenn man mit L_c den zu messenden Induktions-Koëffizienten, mit L_a die Ablesung an der Induktionsnormalen, und mit w_d und w_b die Widerstände der induktionsfreien Zweige bezeichnet.

Wenn der Induktions-Koëffizient L_c zu gross oder zu klein ist, sodass der Bereich der Normalen nicht auslangt, um Gleichgewicht herzustellen, so ändert man das Verhältnis $\frac{w_d}{w_b}$ ab, ähnlich, wie man dies ja auch sonst bei der Wheatstone'schen Brücke thut, wenn man sehr verschieden grosse Widerstände zu vergleichen hat.

Die veränderliche Selbstinduktion (Standard of Selfinduction) wird von Ayrton und Perry dadurch erhalten, dass sie eine drehbare Spule in einer festen Spule anordnen, und beide Spulen von kreisförmiger Gestalt hintereinander von demselben Strome durchlaufen lassen. Die Änderungen des Selbstinduktions-Koëffizienten werden also durch Änderung der gegenseitigen Lage der Spulen erreicht. Die Selbstinduktion ist ein Minimum, wenn die Windungen beider Spulen parallel sind, aber in entgegengesetzter Richtung vom Strome durchlaufen werden; das Maximum der Induktion wird erreicht, wenn man die innere Spule um 180° gedreht hat.

Den Winkel, um den man die Spule dreht, kann man mittels eines Zeigers (vergl. die Fig. 213, die den Apparat halb in Vorderansicht, halb im Schnitt darstellt) auf einer Skala ablesen. Auf der einen Seite ist die Teilung empirisch in Millihenry aufgetragen; die andere Seite trägt zum Zwecke einer Nachaichung eine Gradteilung. Die gangbare Form der Instrumente umfasst eine Änderung des Selbstinduktions-Koëffizienten zwischen etwa 6 und 40 Millihenry (10^6 *cm*).

Da bei diesem Verfahren die Stromstösse, die durch das Galvanometer fliessen, sich in ihrer Wirkung auf die Magnetnadel summieren, kann man durch Steigerung der Geschwindigkeit, mit der man den Doppelkommutator sich drehen lässt, einen etwa im Galvanometerstromkreis noch vorhandenen Strom deutlich sichtbar machen, die Empfindlichkeit der Einstellung also vergrössern.

Will man die Selbstinduktion von Spulen bestimmen, die Eisenkerne enthalten, so muss man die nämliche mittlere Stromstärke und Wechselzahl wählen, für die man den Induktions-Koëffizienten zu wissen wünscht; denn mit der Stromstärke ändert sich auch die magnetische Induktion und Permeabilität des Eisens, von der die Grösse des Induktions-Koëffizienten abhängt.

5. Messung der gegenseitigen Induktion nach Pirani.

Um die gegenseitige Induktion zweier Spulen (etwa der eines Transformators) zu messen, bedient man sich am einfachsten eines von Pirani angegebenen Verfahrens, welches durch untenstehende Abbildung erläutert wird. S_1 und S_2 in Fig. 215 sind die beiden Spulen, für welche der Koëffizient M der gegenseitigen Induktion bestimmt werden soll. Die einen Enden dieser Spulen sind im Punkte A vereinigt; dieser Punkt steht mit zwei veränderlichen induktionsfreien Widerständen R_1 und R_2 in Verbindung, zwischen

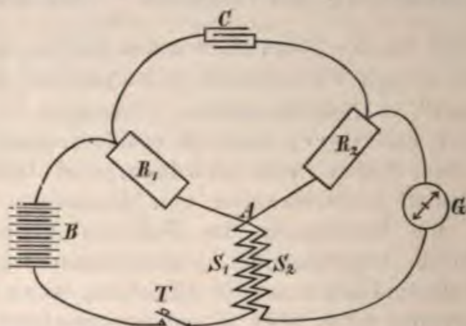


Fig. 215. Messung der gegenseitigen Induktion nach Pirani.

welchen anderseits ein Kondensator von bekannter Kapazität C eingeschaltet ist. In dem Stromkreise, der die induzierende Spule S_1 enthält, liegt an R_1 eine Batterie B und ein Ausschalter T. Der andere Stromkreis besteht aus der Induktionsspule S_2, dem Widerstande R_2 und einem Galvanometer G. Die Widerstände R_1 und R_2 werden so lange verändert, bis beim Niederdrücken oder Öffnen des Tasters T kein Ausschlag des Galvanometers G mehr wahrgenommen wird.

Dann ist: $M = R_1 \cdot R_2 \cdot C$ . . . . 7)

Übrigens kann man zur Messung des Koëffizienten der gegenseitigen Induktion auch das Secohmmeter verwenden.[1])

[1]) Eine weitere von Kempe angegebene, vielfach brauchbare Methode zur Bestimmung von Induktions-Koëffizienten findet sich auch mitgeteilt in des Verfassers »Wechselstrom-Technik«, Kap. X, Abschn. 16, S. 328.

XVII. Kapitel.

Messung der Kapazität.

1. Begriff der Kapazität.

Zwei Leiter, die mit verhältnismässig grossen Oberflächen sich nahe gegenüber stehen und durch einen Isolator getrennt sind, bilden einen Kondensator.

Die typische Form eines Kondensators ist die Franklin'sche Tafel, d. h. eine dünne Glas- oder Ebonittafel, deren beide Seiten nicht ganz bis zum Rande mit Stanniol beklebt sind. Hat der Isolator die Form eines offenen Gefässes, so nennt man die Einrichtung eine Leydener Flasche.

Diejenige Anzahl von Coulomb, die man einem Belag des Kondensators zuführen und vom anderen abführen muss, damit der Potentialunterschied der beiden Belege gerade 1 Volt wird, nennt man die Kapazität. (Vergl. Kap. IX, Abschn. 5, S. 185.)

Als technische Einheit der Kapazität dient das Farad, und ein Kondensator hat eine Kapazität von 1 Farad, wenn eine Ladung mit einer Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb den Spannungsunterschied der beiden Belege auf 1 Volt bringt.

Da 1 Farad für die meisten praktischen Zwecke eine viel zu grosse Einheit ist, so wird der millionste Teil eines Farads, den man ein Mikrofarad nennt, als bequemere Einheit vielfach benutzt.

Wenn man einen Kondensator nach Art einer oder mehrerer Franklin'scher Tafeln herstellt, das Isolationsmaterial eine Dielektrizitätskonstante i besitzt, die Oberfläche des kleineren Kondensatorbeleges F *qcm* und die Dicke des Isolationsmaterials d *cm* beträgt, so ist die Kapazität M dieses Kondensators in Mikrofarad angenähert:

$$M = i \cdot \frac{F}{1{,}131 \cdot 10^7 \cdot d} \quad \ldots \ldots \quad 1)$$

Beispiel: Man will mit paraffiniertem Papier als isolierende Zwischenschicht (Dielektrizitäts-Koëffizient 2), dessen Dicke 0,1 *mm* beträgt, einen Kondensator von 3 *qm* Oberfläche herstellen. Wie gross ist seine Kapazität?

Alsdann ist: $i = 2 \qquad F = 30000$ *qcm* $\qquad d = 0{,}01$

$$M = \frac{2 \cdot 30000}{1{,}131 \cdot 10^7 \cdot 0{,}01} = 0{,}53 \text{ Mikrofarad}$$

Für einen cylindrischen Kondensator, wie ihn z. B. ein in das Meer eingebettetes Kabel repräsentiert, ist die Kapazität in Mikrofarad:

$$M = \frac{1}{2 \cdot 900000} \cdot \frac{l}{\text{lognat}\,\frac{R}{r}} \cdot i \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

wenn l die Länge in *cm*, R der innere Radius des äusseren und r der äussere Radius des inneren Belegs ist.

Beispiel: Der Durchmesser des kupfernen Leiters eines Kabels beträgt 0,4 *cm*, der äussere Durchmesser der Guttaperchahülle 1 *cm*, die Länge des Kabels 4500 *km*. Der Dielektrizitäts-Koëffizient des Guttapercha sei 4,2.

Dann ist:

$$R = 1 \qquad r = 0{,}4 \qquad l = 4500 \cdot 10^5 \qquad i = 4{,}2$$

$$M = \frac{4500 \cdot 10^5 \cdot 4{,}2}{1800000 \cdot \text{lognat}\ 2{,}5} = 1143 \text{ Mikrofarad}$$

Ist C die Elektrizitätsmenge in Coulomb, die einen Kondensator von der Kapazität F in Farad auf eine Potentialdifferenz von D Volt ladet, so ist nach der anfänglich gegebenen Definition des Begriffes Kapazität:

$$C = F \cdot D \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Hiernach kann man die Kapazität F finden, wenn man den Kondensator mit einem Normalelemente oder einer Normalbatterie auf eine bekannte Potentialdifferenz ladet, und mit Hilfe eines ballistischen Galvanometers die Elektrizitätsmenge C in Coulomb misst, die bei einer Entladung durch das Galvanometer fliesst.



Fig. 216. Kondensator von Siemens & Halske.

Bei genauen Messungen muss man sich der sehr schwer herstellbaren Luftkondensatoren bedienen, bei welchen die isolierende Zwischenschicht Luft ist. Auch Paraffin, als Isolator verwendet, gestattet zuverlässige Messungen.

Wird Glas, Glimmer, Wachstaffet, mit Schellack oder mit Paraffin getränktes ganz trockenes Papier verwendet, so treten durch Oberflächenleitung und zumal durch Rückstandsbildung leicht störende Erscheinungen ein.

Für praktische Zwecke werden Glimmerkondensatoren hergestellt, die bestimmte Kapazität besitzen. Bei ihnen ist die Rückstandsbildung verhältnismässig gering. Es giebt sogar Zusammenstellungen von Kondensatoren verschiedener Kapazität, die ähnliche Grössenabstufungen besitzen wie die Widerstandskästen.

Fig. 216 zeigt z. B. die äussere Erscheinung eines Glimmerkondensators mit Hartgummideckel, wie ihn Siemens & Halske liefern.

Wegen der Rückstandsbildung, die sich selbstverständlich bei Gebrauch von Wechselstrom besonders störend erweist, ist die Kapazität eines Kondensators für Gleichstrom und Wechselstrom häufig sehr verschieden, für Wechselstrom im allgemeinen erheblich geringer.

2. Messung mit Gleichstrom- und mit dem ballistischen Galvanometer.

Will man die Kapazität zweier Kondensatoren vergleichen, so ladet man jeden derselben mit einer Batterie von unveränderlicher EMK, entladet die Kondensatoren durch ein ballistisches Galvanometer und beobachtet die Ausschlagwinkel, beziehentlich bei Gebrauch eines Reflexionsgalvanometers, die Ausschläge in Skalenteilen. Bei Anwendung hoher Spannungen schaltet man dem ballistischen Galvanometer einen grossen induktionsfreien Widerstand vor.

Bezeichnet man die Elektrizitätsmengen, die von beiden Kondensatoren bei Anwendung einer gleichen EMK von der Grösse e aufgenommen worden sind, mit q′ und q″ und die am ballistischen Galvanometer beobachteten Ausschläge mit α' und α'', so ist:

$$q' = C' \cdot e = k \cdot \sin \frac{\alpha'}{2}$$

$$q'' = C'' \cdot e = k \cdot \sin \frac{\alpha''}{2}$$

Durch Division findet man:

$$\frac{C'}{C''} = \frac{\sin \frac{\alpha'}{2}}{\sin \frac{\alpha''}{2}}$$

Für sehr kleine Winkel, wie sie beim Reflexionsgalvanometer in Betracht kommen, vereinfacht sich die Formel und lautet:

$$\frac{C'}{C''} = \frac{\alpha'}{\alpha''} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4).$$

Um nur kleine Ausschläge am Galvanometer zu erhalten, ist man gelegentlich genötigt, einen Nebenschluss zum Galvanometer zu legen. Dann bedürfen die beobachteten Ausschläge einer Reduktion.

Bedeuten i_g, w_g und L_g die Stromstärke, den Widerstand und den Selbstinduktions-Koëffizienten des Galvanometers, i_n und w_n Stromstärke und Widerstand des induktionsfreien Nebenschlusses, und bezeichnen endlich q_g und q_n die Elektrizitätsmengen, die bei Ent-

ladung des Kondensators durch Galvanometer und Nebenschluss fliessen, so gilt die Gleichung:

$$w_n \cdot q_n - w_g \cdot q_g = K \cdot \sin \alpha$$

worin K die Konstante des ballistischen Galvanometers ist.

Da der Ausschlag α nach Voraussetzung sehr klein sein soll, kann man $K \cdot \sin \alpha = K \cdot \alpha = A \cdot q_g$ [1]) setzen, worin A eine neue Konstante ist.

Setzt man dies ein, so erhält man:

$$w_n \cdot q_n - w_g \cdot q_g = A \cdot q_g$$

Führt man nun für die gesamte Elektrizitätsmenge, die bei Entladung des Kondensators abgegeben wird, den Buchstaben Q ein, so ist: $Q = q_n + q_g \qquad q_n = Q - q_g$

Folglich erhält man:

$$w_n \cdot (Q - q_g) = w_g \cdot q_g + A \cdot q_g$$

oder

$$Q = \frac{q_g \cdot (w_g + w_n + A)}{w_n} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 5)$$

Bemerkenswert ist, dass L, der Selbstinduktions-Koëffizient des Galvanometers, in der Rechnung gar nicht vorkommt.

Für solche Versuche mit Kondensatoren bedarf man eines besonderen Doppelschlüssels, wie er in Fig. 217 mit der zugehörigen Schaltung abgebildet ist. Um eine zuverlässige Isolation zu erhalten, sind alle Metallteile auf Hartgummisäulen (in der Abbildung gerieft gezeichnet) befestigt.

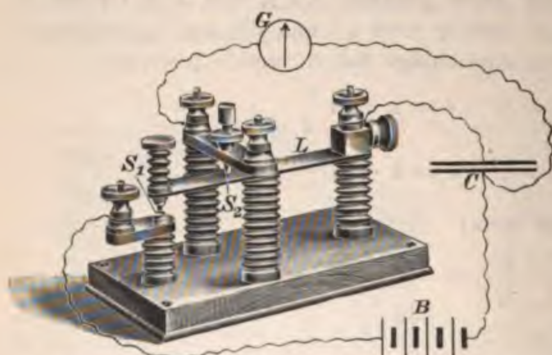


Fig. 217. Kondensatorschlüssel und Schaltung.

Wenn man den Hebel L niederdrückt, wird eine leitende Verbindung zwischen L und der Platte S_1 und der damit leitend verbundenen vorderen Schraube hergestellt, während die Verbindung zwischen der oberen Schraube S_2 und den damit metallisch zusammenhängenden seitlichen Klemmschrauben unterbrochen wird. In dieser Lage des Hebels L wird der Kondensator C durch die Batterie geladen.

Wenn man nunmehr den nach oben federnden Hebel L zurückspringen lässt, so verlässt er die Schraube S_1 und stellt eine Verbindung mit der oberen Schraube S_2 her. Der Kondensator entladet sich dabei durch das Galvanometer G, und man beobachtet den ersten Ausschlag der Galvanometernadel.

[1]) Über die Bestimmung der Elektrizitätsmenge, die bei einem Stromstoss durch das Galvanometer fliesst, vergl. die Fussnote zu S. 309.

3. Bestimmung der Kapazität aus dem scheinbaren Widerstand bei Wechselstrom.

Wenn es sich um die Ermittelung der Kapazität von Hochspannungskondensatoren, Kabeln u. s. w. handelt, sind wegen der Rückstandsbildung die mit Gleichstrom gefundenen Werte nicht verwendbar.

Weil der Kondensator während der einen halben Stromwelle sich ladet und bei der folgenden entgegengesetzt gerichteten Halbwelle sich entladet, geht scheinbar durch das isolierende Mittel eines Kondensators, der an eine Wechselstrommaschine angeschlossen wird, ein Wechselstrom hindurch. Dieser Kondensatorstrom kann mit einem induktionsfreien Strommesser, etwa einem Hitzdrahtampèremeter, gemessen werden. Gleichzeitig legt man an die beiden Belege des Kondensators ein elektrostatisches Voltmeter oder ein Quadrantelektrometer und bestimmt den Spannungsunterschied zwischen den beiden Belegen, während man den Strom einer Wechselstrommaschine auf die beiden Belege wirken lässt.

Für Wechselstrom gilt an Stelle des Ohm'schen Gesetzes die Gleichung:[1]

$$J_{eff} = \frac{E_{eff}}{\sqrt{R^2 + \left(2 \sim \pi L - \frac{1}{2 \sim \pi C}\right)^2}} \quad . \; . \; . \quad 6)$$

wenn man mit J_{eff} die mittlere effektive Stromstärke, wie sie das Ampèremeter anzeigt, mit E_{eff} die mittlere EMK, die das Voltmeter angiebt, mit R den Leitungswiderstand, mit L den Selbstinduktions-Koëffizienten und mit C die Grösse der Kapazität im Stromkreise bezeichnet, und $\sim$ die Anzahl vollständiger Wellen bedeutet, welche die Wechselstrommaschine in einer Sekunde liefert.

Setzt man nun im vorliegenden Falle bei kurzen Zuleitungsdrähten und bei der Abwesenheit jeglicher Selbstinduktion $R = 0$ und $L = 0$, so erhält man:

$$J_{eff} = E_{eff} \cdot 2 \pi \sim C$$

und hieraus:

$$C = \frac{J_{eff}}{E_{eff} \cdot 2 \pi \sim} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

Selbst bei Hochspannungsnetzen, die zumeist eine merkliche, auf das ganze Netz verteilte Kapazität besitzen, wird es möglich sein, nach Formel 6), für $L = 0$, auf die hier angegebene Weise eine mittlere Kapazität zu finden, denn der gleichzeitig mit auftretende Widerstand R pflegt in solchen Fällen nicht gross und der Kondensatorstrom klein zu sein.

Für verwickeltere Fälle verweisen wir auf das, was auf S. 40 u. s. f. in des Verfassers »Wechselstromtechnik« gesagt ist.

[1]) Vergl. Kap. VIII, Abschn. 8, S. 175.

XVIII. Kapitel.

Die Messung der mechanischen Leistung.

1. Die Leistung einer Maschine.

Will man die Leistung L einer Dampfmaschine, eines Wasserrades oder eines Elektromotors ermitteln, so muss man die Kraft P bestimmen, die an irgend einem Punkte des Umfanges der Riemscheibe der Maschine ausgeübt wird, und den Weg s ermitteln, den dieser Punkt in einer Sekunde zurücklegt. Die Leistung ist dann das Produkt aus der Kraft mal dem Wege

$$L = P \cdot s \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Es müssen somit drei Grössen ermittelt werden: die Kraft, die am Umfange der Riemscheibe angreift, der Durchmesser dieser Scheibe und die Geschwindigkeit, mit der sich ein Punkt des Umfanges der Scheibe oder des Riemens bewegt.

Die Vorrichtungen, die zur Ermittelung der an dem Umfange einer Riemscheibe ausgeübten Kräfte dienen, nennt man Arbeitsmesser oder Dynamometer; zur Ermittelung der Geschwindigkeiten bedient man sich der Umdrehungszähler (Tourenzähler oder Tachometer). Die Arbeitsmesser werden entweder dazu verwendet, die von einer Maschine unter bestimmten Betriebsverhältnissen entwickelte Arbeit zu ermitteln, oder dazu, die von einer bewegten Maschine, z. B. einer Dynamomaschine, aufgenommene Leistung zu messen. Nach diesen beiden Zwecken zerfallen die Apparate in Brems- (Absorptions-) Dynamometer und Übertragungs- (Transmissions-) Dynamometer.

2. Der Prony'sche Zaum.

Die von einem Motor geleistete Arbeit wird bei diesem Apparate verbraucht und durch Reibung in Wärme umgesetzt; die Grösse dieser Reibungsarbeit wird gemessen. Auf die Riemscheibe werden zwei passend abgedrehte Holzbacken aufgesetzt (vergl. Fig. 218), die durch Schrauben zusammengepresst werden. An einem der beiden Holzbacken wird ein ziehendes oder drückendes Gewicht angebracht, durch welches man das Gleichgewicht herstellt, oder man

lässt das freie Ende des Hebels auf die Wagschale einer Wage wirken oder man bringt an demselben eine Federwage an.

Zwei passend angeordnete Anschläge aa verhindern, dass der Hebel sich zu weit aus der Gleichgewichtslage entfernt. Man zieht die Schrauben SS derart an und wählt das Gewicht p so, dass der Hebel frei zwischen den Anschlägen aa schwebt, während die Riemscheibe im Sinne des Pfeiles umläuft. Werden die Schrauben SS zu stark angezogen, so wird der Hebel dauernd gegen den einen Anschlag angedrückt; wenn dagegen die Schrauben zu locker sitzen, ist die Reibung zu gering, und der Hebel legt sich gegen den anderen Anschlag.

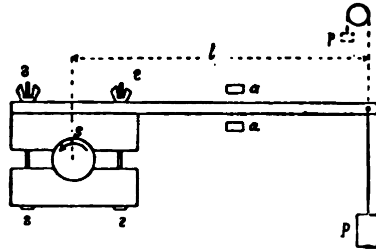


Fig. 218. Der Prony'sche Zaum.

Wenn der Hebel zwischen beiden Anschlägen frei schwebt, so ist das an der Riemscheibe vom Radius r hervorgerufene Moment der Reibung $K \cdot r$ gleich dem statischen Moment des Hebels samt Belastung, gleich $l \cdot (P + p)$, wenn P die Belastung, l die Länge des Hebelarmes und $l \cdot p$ das statische Moment der Bremsvorrichtung bedeutet.

Die Grösse p bestimmt man dadurch, dass man den Bremszaum bei s auf eine Schneide legt und durch die Wirkung eines Gegengewichtes p Gleichgewicht herstellt.

Macht während der Messung die Welle U Umläufe in der Minute so legt jeder Punkt des Umfanges der Riemscheibe in dieser Zeit den Weg $2 r \pi U$, und in einer Sekunde $^1/_{60}$ dieses Weges zurück; somit ist:

$$s = \frac{2 r \pi U}{60} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Die in einer Sekunde von der Reibung geleistete Arbeit A ist $A = K \cdot s$ und somit $A = K \cdot \frac{2 r \pi U}{60}$ oder, da $K \cdot r = l \cdot (P + p)$ ist:

$$A = \frac{2 r \pi U \cdot l (P + p)}{60 \cdot r} \, kgm \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Die gesuchte Leistung L in Pferdestärken erhält man, wenn noch durch 75 dividiert wird (vergl. Kap. IX, Abschn. 3, f. S. 181); somit ist:

$$L = \frac{2 \pi \cdot U \cdot l (P + p)}{60 \cdot 75} = \frac{U \cdot l \cdot (P + p)}{716} \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Um die Reibung möglichst gleichförmig zu machen, schmiert man gleichzeitig durch einen oben bei s durch den oberen Bremsbacken durchgehenden Kanal mit Wasser oder mit Öl. Um die Bremsscheibe zu kühlen, spritzt man von innen gegen den Kranz derselben kaltes Wasser.

Wenn die Schwingungen des Hebelarmes, die niemals ganz zu vermeiden sind, nicht zu bedeutend sind, kann man mit dem Prony'schen Zaume nahezu bis auf 1 % genau messen.[1])

3. Bandbremsen.

Bei nicht zu grossen Arbeitsleistungen, wie solche z. B. bei den meisten Elektromotoren vorkommen, erhält man ganz brauchbare Ergebnisse mit den einfachen Gurt- oder Bandbremsen. Man legt um die Riemscheibe des Motors ein Eisenband, Kupferband oder einen Gurt, der oben an einer Federwage hängt und unten ein Gewicht trägt (vergl. Fig. 219)[2]). Dieses Gewicht wird so lange verändert, bis die Umlaufszahl der Riemscheibe gerade den normalen Arbeitsverhältnissen der Maschine entspricht. Der Unterschied zwischen den an der Federwage abgelesenen Spannungen bei angetriebener Scheibe und dem Gewichte des Gurtes samt angehängtem Gewichte giebt ohne weiteres die Kraft K der Reibung, die am Umfange der Riemscheibe angreift.



Fig. 219.
Einfache Bandbremse.

Zumal bei Elektromotoren lässt sich diese Methode sehr leicht anwenden. Man liest die Spannung (in Kilogrammen) an der Federwage ab, während dem Motor Strom zugeführt wird und der Motor arbeitet. Dann hebt man die Bürsten (Stromabnehmer) ab, führt durch Erschütterungen der Riemscheibe unter den einander entgegenwirkenden Kräften der Elastizität der Federwage und des Zuges des angehängten Gewichtes eine Gleichgewichts-

---

[1]) Beachtung verdient jedenfalls der Vorschlag, den neuerdings A. Grau gemacht hat, dahin gehend, die Reibungsbremsung durch eine elektrodynamische Bremsung durch Foucault-Ströme zu ersetzen.

Auf die Welle des zu bremsenden Motors wird eine Kupferscheibe aufgesetzt. Diese Kupferscheibe rotiert zwischen den nahestehenden Polen eines Hufeisenelektromagneten, der an dem kürzeren Ende einer Hebelwage angebracht und durch Gegengewichte genau ausbalanciert ist.

Ist der Elektromagnet erregt und rotiert die Kupferscheibe, so entstehen in der Scheibe Foucault-Ströme, die auf die Scheibe eine bremsende Wirkung ausüben, und den Elektromagneten in der Drehrichtung der Scheibe fortzuziehen suchen. Dieser Zugkraft wird durch aufgelegte Gewichte, wie beim Prony'schen Zaum, das Gleichgewicht gehalten.

Durch Änderung der Erregung des Elektromagneten oder Änderung der Spaltweite des Magneten kann die Bremswirkung in weiten Grenzen verändert werden. Die konstruktive Durchführung des Prinzips, die in ETZ, Bd. XXI, 1900, S. 266 beschrieben ist, erscheint für den Gebrauch in der Technik noch nicht völlig ausgereift.

[2]) Das ablaufende Ende des Bremsbandes wird bei dieser Anordnung schmal geschnitten und durch einen genügend breiten Schlitz des auflaufenden Teiles des Bandes durchgesteckt.

stellung herbei und liest die Spannung der Federwage abermals ab. Sind die abgelesenen Spannungen P und Q, so ist die Leistung L des Motors in Pferdestärken:

$$L = \frac{2\,r\,\pi\,U}{60 \cdot 75}\,(P - Q), \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

wenn r wiederum den Umfang der Riemscheibe und U die Umlaufszahl in der Minute bedeutet.

Auch kann man einen einfachen Lederriemen oder Blechstreifen über die Riemscheibe des zu bremsenden Motors legen, beide Enden des Riemens mit Gewichten beschweren und das auf der Seite des ablaufenden Riemens liegende Gewicht L auf eine Federwage aufsetzen (vergl. Fig. 220). Eine kleine über den Rand der Scheibe übergreifende Klammer, die man an der obersten Stelle des Riemens anbringt, verhindert dessen Abfallen.

Wählt man R ungefähr dreimal so gross als L, so nimmt die Federwage noch einen Teil F des letzteren Gewichtes auf. Die am Umfange der Welle wirkende Kraft K der Reibung ist dann:

$$K = R - L + F. \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

Statt eines Metallbandes, Riemens oder Gurtes kann man auch Seile verwenden. Die nebenstehende Abbildung Fig. 221 zeigt z. B. die Einrichtung einer solchen Seilbremse. Um eine stets gleichbleibende Anlage der Seile zu sichern, sind einige Holzklötze an denselben befestigt, die rechts und links Leisten besitzen, die über die Ränder der Scheibe übergreifen und an der Innenseite Nuten tragen, in welchen die Seile liegen.

Soll eine solche Bremseinrichtung längere Zeit hindurch auf der Riemscheibe liegen bleiben, so muss für Abführung der entwickelten Wärme gesorgt werden. Entweder wird deshalb während des Versuches reichlich Kühlwasser von aussen oder von innen gegen den Kranz der Riemscheibe gespritzt, oder man bringt die Bremsscheibe an einer geeigneten Stelle mit einem Stücke Eis in Berührung, welches sanft angedrückt wird.

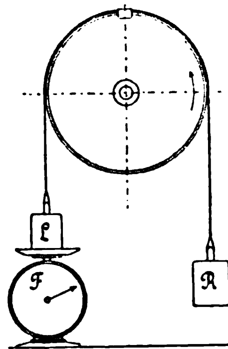
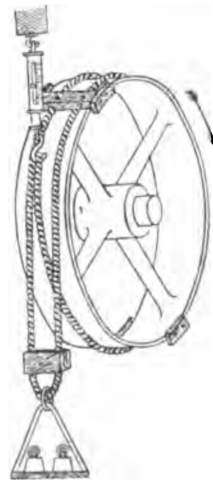


Fig. 220. Anwendung einer Bandbremse.


Fig. 221. Seilbremse.

Wenn die Riemscheiben der zu bremsenden Motoren stark ballig sind, empfiehlt es sich, dieselben während des Versuches durch eine gerade abgedrehte besondere Bremsscheibe zu ersetzen und auf diese das Bremsband aufzulegen. (Vergl. auch Fig. 222.)

4. Bandbremsen mit Selbstregelung der Spannung.

Da es fast unvermeidlich ist, dass bei nicht ganz gleichmässiger Schmierung Unterschiede in der Reibung oder auch in der Umlaufszahl der Wellen und damit unregelmässige Schwankungen des ganzen Bremsapparates eintreten, so ist man vielfach bemüht gewesen, eine ausgleichend wirkende Selbstregulierung an den Bremseinrichtungen anzubringen. Vortreffliche Anordnungen mit Selbstregelung hat Brauer konstruiert; eine derselben, die besonders für Elektromotoren sehr geeignet ist, wollen wir im Nachstehenden beschreiben (vergl. Fig. 222). Mit übergreifenden anschraubbaren Haken wird an die Riemscheibe R der zu bremsenden Maschine genau centrisch eine

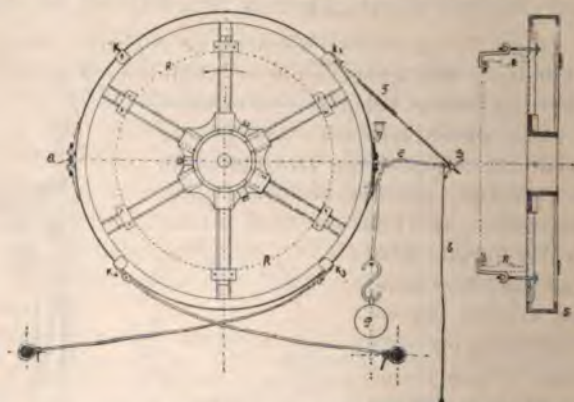


Fig. 222. Brauers Bandbremse mit Selbstregelung der Spannung.

besondere Bremsscheibe S angesetzt. Diese Bremsscheibe hat gusseisernen Kranz und Nabe und prismatische schmiedeeiserne Arme, damit sie an Riemscheiben von verschiedener Grösse angesetzt werden kann. Um den äusseren Umfang des Kranzes S ist ein Kupferband herum gelegt. Kleine Klammern k_1, k_2, k_3, k_4, welche über die Ränder der Scheibe S hinweg gehen, verhindern das Abfallen des Bremsbandes. Die beiden untersten Klammern k_3 und k_4 sind durch lose Schnuren am Boden befestigt, damit der Bremsring sich nicht weit aus seiner mittleren Gleichgewichtslage entfernen kann.

Eine links- und rechtsgängige Schraube A dient zur Anspannung des Bremsbandes vor Beginn des Versuches.

Änderungen der Spannung während der Arbeit werden durch die Flügelmutter B bewerkstelligt. Die selbstthätige Regelung der Spannung wird durch den Spannhebel C bewirkt. Überwiegt das Moment der Reibung, so wird das Gewicht P gehoben, der Bremsring verschiebt sich entgegengesetzt der Richtung des Uhrzeigers. Da aber das aussen gelegene Ende des Hebels C durch die Schnur E zurückgehalten wird, so wird der Hebel sich drehen und dadurch die Spannung des Bremsbandes und die Grösse der Reibung vermindern.

Sind alle übrigen Teile der Bremseinrichtung gut ausbalanciert und zeigt die Schnur E keine Spannung, so giebt das Gewicht P ohne weiteres die am Umfange des Bremsrades wirkende Kraft K der Reibung. Durch das über C angebrachte Tropfgefäss wird während des Bremsversuches mit Öl geschmiert.

5. Messung der von einer Dynamomaschine aufgenommenen oder geleisteten Arbeit.

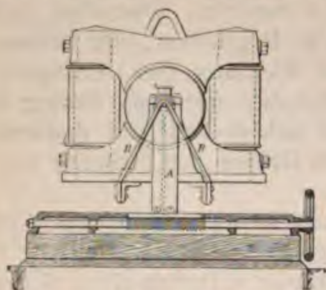
Die zu untersuchende Dynamomaschine wird von ihrem Fundamente losgenommen und an zwei durch geeignete Pfannen unterstützten Schneiden so aufgehängt, dass die Maschine völlig frei um die geometrische Achse der Ankerwelle schwingen kann. Wenn die Maschine nunmehr durch einen Riemen angetrieben wird und elektrische Energie erzeugt, so übt der rotierende Anker eine Zugkraft auf die Feldmagnete aus, und die Maschine wird dadurch so weit aus ihrer vertikalen Lage herausgedreht, bis das Moment des Gewichtes der abgelenkten Maschinenteile gleich dem Momente der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Anker und Feldmagneten geworden ist. Mit der Maschine selbst verbindet man einen Zeiger, der sich auf einer Skala bewegt und die Grösse der Drehung des Maschinengestelles erkennen lässt.

Nachdem man die Maschine ausser Thätigkeit gesetzt hat, bringt man durch eine über eine Rolle geführte, an einer geeigneten Stelle an der Maschine befestigte Schnur diese genau in die vorige Stellung zurück, indem man an das freie Ende der Schnur so lange Gewichte anhängt, bis der Zeiger auf der vorher erwähnten Skala dieselbe Drehung wieder anzeigt.

Das Produkt aus Grösse der Kraft und senkrechtem Abstand der Kraft von der Drehachse ist dann ohne weiteres gleich dem Momente der an dem Umfange der Riemscheibe angreifenden Kraft, die man messen will.

Wenn die Centrierung der Schneiden gut gelingt und die Maschine um die Schneiden leicht drehbar ist, kann man nach dieser Methode recht gute Resultate erhalten.

Die nebenstehende Abbildung Fig. 223 lässt erkennen, in welcher Weise sich eine derartige Aufhängung einer Maschine in Schneiden bewerkstelligen lässt. An den oberen Enden der Pfeiler A sind die Pfannen angebracht, während die Tragschneiden an dem Gestell BB befestigt sind, auf welchem die Dynamomaschine aufruht.


Fig. 223. Arbeitende Dynamomaschine als Leitungsmesser.

Man sieht auch leicht ein, dass man sich dieser Methode sowohl bedienen kann, wenn die Dynamomaschine als Stromerzeuger von einer Dampf- oder Gaskraftmaschine in Thätigkeit gesetzt wird, als auch, wenn man der Dynamomaschine Strom zuführt, und sie als Elektromotor gebraucht.

6. Das Riemendynamometer von v. Hefner-Alteneck.

Wenn man die auf die Riemscheibe einer elektrischen Maschine übertragene Arbeitsmenge messen will, kann man sich des in der Überschrift genannten Instrumentes bedienen, welches ohne weiteres in den Riemen eingeschaltet werden kann.[1])

Wenn man nämlich den die Arbeit übertragenden Riemen durch eine Leitrolle aus seiner Richtung ablenkt, so erfährt diese Rolle einen Druck, der zur Riemenspannung in einem einfachen Verhältnisse steht. Bei dem v. Hefner-Alteneck'schen Apparate wirkt nun auf eine bewegliche Rolle 7 von der einen Seite der Druck des ziehenden und von der entgegengesetzten Seite der Druck des gezogenen Riemens. Der Unterschied dieser Drucke wird durch eine Federwage g gemessen.

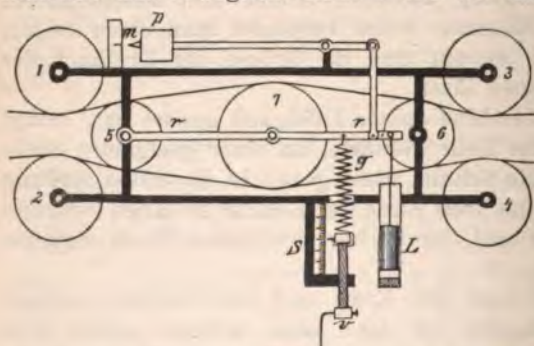


Fig. 224.
Transmissionsdynamometer von v. Hefner-Alteneck.

Die nebenstehende Abbildung Fig. 224 giebt ein Bild der Anordnung des Apparates. Um die Riemen einzulegen, wird die Vorder-

[1]) Ist die Dynamomaschine nicht auf ihrem Fundament verschiebbar, so muss man, um die Riemenspannung nicht zu sehr zu erhöhen, den Riemen etwas verlängern.

platte des Apparates abgeschraubt; der ziehende Teil des Riemens kommt dabei auf die Seite, auf der sich die Feder der Federwage g befindet. Nachdem man nunmehr die Vorderplatte wieder aufgebracht hat, wird der ganze Apparat derart an einer widerstandsfähigen Holzsäule befestigt, dass die Ablenkung der Riemen von der getriebenen Scheibe zu den beiden Führungsrollen 1 und 2 möglichst gering wird, und die Mittellinie des beweglichen Hebels r r möglichst in die Verbindungslinie der Achsen der treibenden und der getriebenen Riemscheibe zu liegen kommt.

Durch Klopfen mit einem Holzhammer an beiden Riemenhälften und am Apparat werden alle Ungleichheiten in den Spannungen der beiden Riemen ausgeglichen und alle Reibungswiderstände der Ruhe möglichst aufgehoben. Spielt dann die Spitze des Zeigers noch nicht auf die Marke m ein, so führt man die Einstellung dadurch herbei, dass man das Laufgewicht p verschiebt.

Hierauf lässt man den Riemen laufen und spannt durch Drehen des Schraubenkopfes v die Feder g so lange an, bis die Zeigerspitze genau um die Marke m herum schwankt. Selbstverständlich ist der Apparat nur brauchbar, wenn der Riemen vollständig gleichförmig ist und keinerlei Wülste zeigt. Um die unregelmässigen Bewegungen und Stösse zu vermindern, ist durch ein Gelenk mit dem Ende des Hebels r ein Kolben L verbunden, der in einen mit Öl gefüllten Cylinder eintaucht. (Man nennt eine derartige dämpfende Einrichtung eine Kataraktpumpe.)

Die Skala S ist in Millimeter eingeteilt; den Wert der einzelnen Skalenteile bestimmt man durch besondere Aichung vor und nach der eigentlichen Kraftmessung.

Zu dem Zwecke wirft man den Riemen von der getriebenen Scheibe ab und klemmt den treibenden Riemen an die treibende Scheibe, nachdem dieselbe festgestellt worden ist, etwa durch eine Schraubzwinge, an. Über die Rolle 2 lässt man den Riemen lose herabhängen und hängt nun an diesen Riemen Gewichte, bis der Zeiger auf Null steht. Dann hängen wir an das über die Rolle 2 herabhängende Riemenstück Gewichte von 1, 2, 3 bis 20 *kg* und beobachten, auf welche Stellen der Skala S der an der Feder g befindliche Zeiger weist, wenn man durch Drehen der Schraube v den Zeiger p wieder auf m zum Einspielen gebracht hat. Auch bei dieser Aichung ist es nötig, während jeder Messung durch Klopfen des Riemens und des Apparates mit einem Holzhammer die Reibungswiderstände der Ruhe möglichst zu beseitigen. Auf diese Weise wird ermittelt, welcher Differenz der Riemenspannungen eine bestimmte Angabe an der Skala S entspricht.



Ist P die in Kilogramm umgerechnete Angabe des Zeigers bei einer Arbeitsmessung, so ist die übertragene Leistung in Pferdestärken:

$$L = \frac{2\,r\,\pi\,U}{60 \cdot 75} \cdot P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Nimmt man Radius r und Umlaufszahl (in 1 Min.) U für die getriebene Scheibe, so erhält man die übertragene Arbeit ohne den durch das Gleiten des Riemens herbeigeführten Verlust; benutzt man dagegen r und U für die treibende Scheibe, so misst man die übertragene Arbeit einschliesslich dieses Verlustes.

Bei einigermassen geschickter Handhabung ist der v. Hefner-Alteneck'sche Arbeitsmesser ein sehr zuverlässiges Instrument für die Messung des Arbeitsverbrauches.

Die nachstehende Abbildung (Fig. 225) zeigt eine einfache von W. Kohlrausch angegebene Methode, nach der man denselben

Fig. 225. Gebrauch des Riemendynamometers bei Bremsversuchen.

Apparat auch zur Bestimmung der von einem Motor erzeugten Arbeit, also bei Bremsversuchen, verwenden kann.

Über das Schwungrad des zu bremsenden Motors wird ein Bremsband a d k i c b gelegt. An den Enden dieses Bremsbandes sind von a bis e und b bis f ganz gleichförmige Riemen befestigt, die durch die Rollen des Dynamometers hindurch gehen. Das Ende des einen Riemens ist bei g an der Wand befestigt, von dem anderen Ende aus läuft ein starker Strick über Rollen bis zum Hebel h. Durch Bewegung des Hebels h mit der Hand kann man die Spannung des Bremsbandes derart regeln, dass der Motor unveränderlich mit der richtigen Tourenzahl läuft und gerade die gewünschte Arbeit leistet.

An der Skala des Riemendynamometers kann man, indem man verfährt, wie oben beschrieben worden ist, ohne weiteres die Differenz P der Riemenspannung in Kilogramm ablesen. Diese Differenz P muss aber noch um das Gewicht p des von der Bremsscheibe getragenen

Bremsbandes vergrössert werden. Ist L die Länge, G das Gewicht des Bandes, so ist dieses Gewicht:

$$p = \frac{2r}{L} \cdot G.$$

Die Leistung L des Motors ist dann:

$$L = \frac{2 r \pi \cdot (P + p) \cdot U}{60 \cdot 75} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

7. Das Dynamometer von Fischinger der Elektrizitätswerke vorm. Kummer & Co.

Auch dieses Instrument ist ein Übertragungs-Arbeitsmesser und hat den besonderen Vorzug, dass es innerhalb ziemlich weiter Grenzen brauchbar ist, weil bei ihm keine Elastizität von Federn oder tordierter Wellen in Frage kommt, und weil Störungen durch Wirkung der Centrifugalkraft ausgeschlossen sind. Auf einer Welle a, mit der die drei-Arme d, e und f (Fig. 228) fest verbunden sind, sitzen zwei lose Riemenscheiben b und c (Fig. 226). Der Arm d ist mit einem nach zwei Richtungen hin verstellbaren Gegengewicht versehen; dadurch wird das Armsystem d, e und f derart ausbalanciert, dass sein Schwerpunkt in der Mittelachse der Welle liegt. Im Arme e befindet sich ein Doppelhebel g g′, dessen Arm g durch ein verschiebbares Stück mit dem Hebel h verbunden ist; der andere Arm g′ drückt in der Mittellinie der durchbrochenen Welle a gegen eine verschiebbare Stahlstange s. Um s aufnehmen zu können, ist die Welle a mit einer konzentrischen Ausbohrung versehen. Diese Stahlstange s überträgt den Druck, der auf sie wirkt, auf einen Winkelhebel r r′. Der Arm r′ trägt eine Wagschale, der andere Arm r, der mit einem Gegengewichte versehen ist, endet unten in eine Schneide, die vor einer Skala spielt. (Vergl. Fig. 226.) Der Hebel h sitzt mit dem Doppelhebel k k′, jedoch rechtwinklig zu diesem, auf einer drehbaren Welle, die in der Nabe und dem Arme f des oben erwähnten dreiarmigen Gussstückes d e f gelagert ist.

Im Innern der Riemenscheiben b und c sind mit Stahlplatten armierte Vorsprünge n′ o′ angegossen, die mittels kleiner beweglicher Druckstäbchen t den Riemenzug auf den Doppelhebel k k′ übertragen. (Vergl. Fig. 227.)

Um die Druckstäbchen einführen zu können, sind in den Riemenscheiben die Löcher y und y′ angebracht.

Das Dynamometer wird zwischen den Arbeit liefernden Motor und die Kraft verbrauchende Maschine gestellt. Der treibende Riemen wird auf die Riemenscheibe c, der getriebene Riemen auf die Scheibe b aufgelegt. Bewegt sich die Welle a jedoch dann nicht in der Pfeilrichtung (vergl. Fig. 226 rechts), so müssen die Riemen vertauscht

werden. Durch den Zug, der auf die angetriebene Riemenscheibe ausgeübt wird, wird zunächst eine Verdrehung der beiden Scheiben gegeneinander veranlasst. Diese bewirkt eine Verdrehung des Doppel-

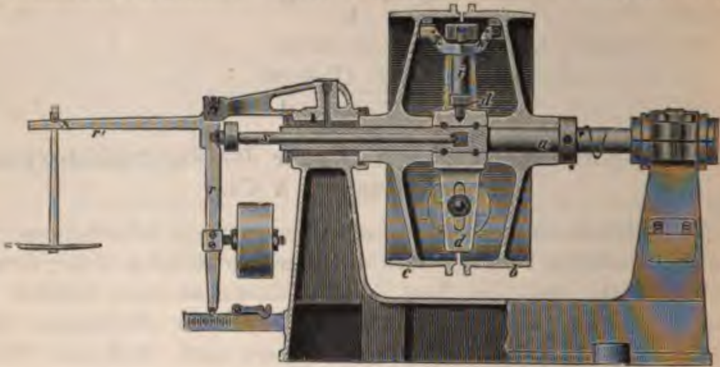


Fig. 226.

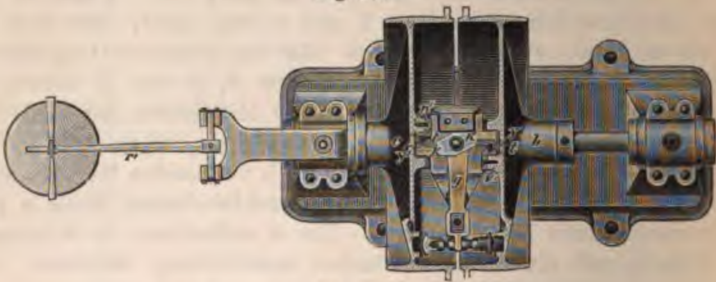


Fig. 227.
Fischingers Transmissionsdynamometer.

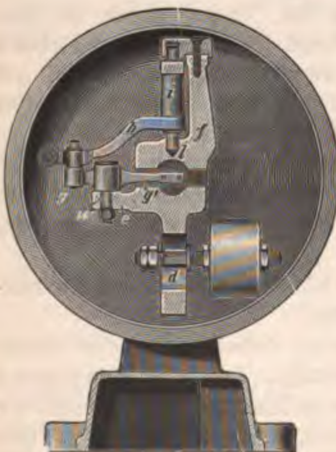


Fig. 228.

hebels k k'. Mit k k' dreht sich die Achse i, dadurch wird durch Vermittelung des Hebels h der Doppelhebel g g' bewegt und die Stahlstange s in ihrer Längsrichtung verschoben. Der Hebel r' hebt sich infolgedessen und der damit fest verbundene Hebelarm r schlägt auf der Skala aus.

Auf die Wagschale legt man nun solange Gewichte auf, bis der Hebelarm r wieder auf den Nullpunkt der Skala einspielt. Dann hält die Wirkung der Gewichte gerade dem Riemenzuge das Gleichgewicht.

Nach Erledigung der Messung wirft man den getriebenen Riemen ab und

ermittelt unter im übrigen gleichen Bedingungen (gleiche Umlaufszahl) die Leergangsarbeit, die das Dynamometer erfordert.

Dieser Betrag ist von dem Ergebnis der ersten Messung abzuziehen. Der Kraftverbrauch in Pferdestärken ist einfach:

$$= \frac{\text{Riemenzug} \times \text{Riemengeschwindigkeit}}{75}.$$

Die Wage, mit der der Riemenzug ausgewogen wird, ist als Decimalwage ausgebildet.

Um die Reibungswiderstände möglichst klein und die Empfindlichkeit möglichst gross zu machen, sind die Scharnierbolzen der Winkelhebel r r', die Unterstützung der Wagschale und der Doppelhebel g g' zu Schneidenausgebildet, die auf Pfannen aufruhen.

8. Die Vorrichtungen zur Messung der Umdrehungszahlen (Tourenzähler, Tachometer).

Um die Zahl U der Umdrehungen einer Welle zu bestimmen, bedient man sich zumeist der sogenannten Tourenzähler. Auf einer Welle, deren Ende mit einem Dreispitz versehen ist, sitzt eine Schraube ohne Ende, die in zwei Zahnräder eingreift. Bei jedem Umgange der Welle wird jedes Zahnrad um einen Zahn verschoben. Das eine Zahnrad hat 100, das andere 101 Zähne; die Vorderseiten der beiden Zahnräder sind mit Teilungen versehen, die eine mit



Fig. 229. Einfacher Umdrehungszähler.

Ziffern von 0 bis 100, die andere von 0 bis 101. An einem festen stehenden Zeiger liest man die Umdrehungen von 0 bis 100, an der Verschiebung der Nullpunkte beider Scheiben gegeneinander die Hunderte der Umdrehungen ab (vergl. Fig. 229).

Man liest zunächst die Stellung der Zeiger ab und notiert dieselbe.

Nach dem Schlage einer Sekundenuhr drückt man hierauf gerade bei Beginn einer vollen Minute den Dreispitz des in die Verlängerung der Achse gehaltenen Tourenzählers in das Körnerloch der Welle,

deren Umlaufszahl gemessen werden soll, zieht nach Verlauf von 60 Sekunden den Tourenzähler zurück, und liest abermals ab. Die Differenz der neuen Angabe der Zifferblätter und der vorher beobachteten giebt die Zahl U der Umdrehungen der Welle in einer Minute.

Bequemer sind die Tourenzähler, die im Innern der Kapsel ein eigentliches Zählwerk enthalten (vergl. Fig. 230). Hinter den vier Öffnungen des Gehäuses befinden sich Räder, die auf ihrem Umfange die Zahlen 0 bis 9 tragen. Wenn die Welle eine Umdrehung macht, springt das hinterste, vierte Rad von einer Ziffer auf die nächste. Wenn die Welle 10 Umdrehungen gemacht hat, verschiebt sich das dritte Rad um eine Ziffer, bei 100 das zweite, bei 1000 das erste um eine Ziffer.



Fig. 230. Umlaufsszähler.

Man kann somit ohne weiteres aus der Differenz der Ziffern, die man am Tourenzähler abliest, nachdem er an d oder u eine Minute lang mit der umlaufenden Welle in Berührung gewesen ist, die Zahl der Umläufe ermitteln.

Das Einsetzen des Dreispitzes in die Welle in dem Augenblicke, in dem der Sekundenzeiger einer Uhr die 60 überschreitet, erfordert einige Übung. Wenn der Dreispitz nicht ganz sicher greifen will, überzieht man ihn zweckmässig mit etwas dünnem Gummischlauch.

Auf dem Prinzipe, welches dem Pendelregulator zu Grunde liegt, beruhen die vielfach in der Praxis eingeführten Tachometer von Buss-Sombart und die Tachometer und Tachographen neuerer Konstruktion von Dr. Horn und Anderen.

An der rotierenden Achse D dieser Instrumente (vergl. Fig. 231) sind zwei bewegliche Pendel E_1 und E_2 befestigt, die infolge der Centrifugalkraft das Bestreben haben, sich von dieser Achse zu entfernen. Dem Zuge, den die mit der Geschwindigkeit wachsende Centrifugalkraft ausübt, wirken Federn entgegen. Mit den beiden Pendeln ist eine Parallelogrammführung verbunden, durch die eine Stange G bewegt wird, deren abgewendetes Ende durch einen Hebel H mit einem Zahnrade in Verbindung steht. Wenn diese Stange sich verschiebt, wird durch den Hebel H ein Zahnrad a_1 gedreht, das mit einem Zeiger verbunden ist, der unmittelbar auf einer Skala die Zahl der Umdrehungen in der Minute anzeigt.

Wenn man die Schraube i lüftet, kann der ganze Apparat in den Lagern gedreht und das Zifferblatt in eine für die Ablesung passende Lage gebracht werden. Am besten ist es, den Apparat

in der Verlängerung der Achse aufzustellen, deren Geschwindigkeit gemessen werden soll, und ihn durch einen Mitnehmer in Rotation zu versetzen. Ist dies nicht angängig, so bringt man auf der Achse eine Riemscheibe an, die genau dieselbe Grösse wie B hat, und

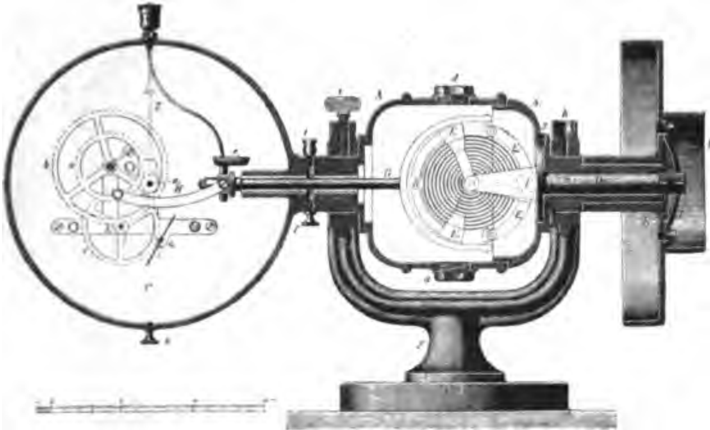


Fig. 231. Tachometer.

überträgt die Drehung durch einen leichten Riemen. Überschreitet die Umlaufszahl eine gewisse Grenze, so überträgt man auf die zweite Riemscheibe des Apparates, welche die doppelte Grösse wie B



Fig. 232. Tachometer.

hat, und benutzt die mehr nach dem Centrum zu liegende Teilung (vergl. Fig. 232).

Neuerdings sind auch Handtachometer nach demselben Prinzipe konstruiert worden, die durch einen angesetzten Körner in derselben Weise an die zu untersuchende Welle angedrückt werden, wie wir dies vorher für die gewöhnlichen Tourenzähler beschrieben haben. Die Fig. 233 zeigt dieses Handtachometer im Etui liegend. Je nachdem man grössere, mittlere oder kleinere Umlaufszahlen messen will, benutzt man eine der drei Achsen, und setzt auf diese den Körner

auf. Ist die Umlaufszahl nicht bereits annähernd bekannt, so benutzt man zuerst die den höchsten Umlaufszahlen entsprechende Achse.

Alle diese Instrumente haben den grossen Vorteil, dass man Schwankungen der Umlaufszahl am Zeiger sofort wahrnimmt und



Fig. 233. Handtachometer.

dass man nicht nötig hat, die Beobachtung auf einen ganz genau begrenzten Zeitraum auszudehnen. Es empfiehlt sich aber, von Zeit zu Zeit die Angaben der Tachometer durch Vergleichung mit einem gewöhnlichen Tourenzähler zu kontrollieren.

XIX. Kapitel.

Die Schaltungen an dynamoelektrischen Maschinen.

1. Einteilung der Dynamomaschinen.

Unter den Stromerzeugern nehmen jetzt die Dynamomaschinen die weitaus wichtigste Stelle ein. Dynamoelektrische Maschinen sind Vorrichtungen, durch welche mechanische Arbeit in elektrische Energie oder umgekehrt elektrische Energie in mechanische Arbeit umgewandelt wird. Die Wirksamkeit dieser Vorrichtungen beruht auf der Erzeugung von Induktionsströmen, die in Stromleitern dadurch entstehen, dass man dieselben in einem Magnetfelde derart bewegt, oder das Magnetfeld sich drehen lässt, sodass die Anzahl der Kraftlinien, die die Leiter schneiden, sich periodisch ändert.

An jeder Dynamomaschine sind hiernach zwei Hauptteile zu unterscheiden:

1. das induzierende System, die Feldmagnete, durch welche ein oder mehrere magnetische Felder erzeugt werden, und 2. das Leitersystem, in dem die Induktionsströme entstehen; dieser Teil heisst Anker oder Armatur (in französischen Werken wohl auch Induktor).

Das Magnetfeld kann durch permanente Magnete erzeugt werden; dann heisst die Maschine eine Magnetmaschine; oder es können Elektromagnete benutzt werden, die durch eine besondere ausserhalb der Maschine gelegene Stromquelle erregt werden; dann sagt man, die Maschine habe Fremderregung. Oder endlich, und dieser Fall liegt bei den weitaus meisten Maschinen vor, die Ströme, welche die Windungen der Feldmagnete umfliessen, stammen aus dem Anker der Maschine selbst; solche Einrichtungen nennt man Maschinen mit Selbsterregung oder dynamoelektrische Maschinen im engeren Sinne.

Dass Maschinen der zuletzt erwähnten Art überhaupt Ströme erzeugen können, beruht auf dem von Werner von Siemens im Jahre 1867 [1]) entdeckten sogenannten dynamoelektrischen Prinzip.

[1]) Wie alle grösseren Erfindungen war auch die Siemens'sche nicht ohne Vorläufer. Schon im Jahre 1855 hatte der Däne Soren Hyorth einen ähnlichen Gedanken ausgesprochen, und kurz vor Siemens hatten Varley und mit ihm gleichzeitig Wheatstone dieselben Anordnungen in Vorschlag gebracht. Werner von Siemens hat aber zuerst die praktische Bedeutung des Gedankens klar erkannt und die der Anwendung entgegenstehenden Schwierigkeiten mit vollem Erfolge überwunden.

Durch den remanenten Magnetismus, der in dem Eisen der Feldmagnete nach dem Gebrauche zurückbleibt, wird in dem Anker ein zunächst schwacher Induktionsstrom erregt; dieser Strom wird durch die Wickelung der das Magnetfeld erzeugenden Elektromagnete hindurchgeführt und verstärkt den Magnetismus. Nunmehr werden im Anker durch die Bewegung im gekräftigten Magnetfeld stärkere Induktionsströme erzeugt, die wiederum in den Feldmagneten, deren Schenkel sie umkreisen, einen noch kräftigeren Magnetismus erzeugen. Diese wechselseitige Verstärkung geht in derselben Weise fort, bis die Maschine ihren normalen, der Belastung und der Umlaufszahl des Ankers entsprechenden Zustand erreicht hat. Dieser Prozess des Angehens einer Maschine vollzieht sich meist in wenigen Sekunden.

Ein weiterer Unterschied der elektrischen Maschinen liegt darin, dass eine Art derselben Ströme gleichbleibender Richtung und Stärke liefert; eine andere Art Maschinen erzeugt einen Strom oder gleichzeitig mehrere Ströme von periodisch abwechselnd entgegengesetzter Richtung. Die ersteren heissen Gleichstrommaschinen, die letzteren Wechselstrommaschinen, beziehentlich Mehrphasen- oder Drehstrommaschinen.

Wechselstrommaschinen haben meist Fremderregung. Bei Gleichstrommaschinen mit Selbsterregung sind wieder verschiedene Fälle denkbar.

Der einfachste Fall ist der, dass der gesamte im Anker erzeugte Strom auch die Windungen der Feldmagnete durchfliesst, ehe er aus der Maschine austritt; die Feldmagnetwickelung und der äussere Stromkreis sind dann hintereinander geschaltet. Solche Maschinen heissen Reihenmaschinen (Serienmaschinen) oder Hauptstrommaschinen.

Bei anderen Maschinen wird ein kleiner Teil des im Anker erzeugten Stromes durch zahlreiche Windungen geschickt, die das Eisen der Feldmagnete umgeben; die Wickelung der Feldmagnete bildet einen Nebenschluss von hohem Widerstande zum äusseren Stromkreise. Derartige Maschinen nennt man Nebenschlussmaschinen.

Um Maschinen mit gleichbleibender oder mit der Belastung wachsender Spannung herzustellen, erregt man ferner die Feldmagnete sowohl durch eine Anzahl Windungen, die vom Hauptstrome durchflossen werden, als auch durch Windungen, die einen Nebenschluss zum Anker oder zum äusseren Widerstande der Maschine bilden. Solche Maschinen werden mit dem Namen Verbundmaschinen (wohl auch gemischte Maschinen, Compoundmaschinen) bezeichnet.[1])

[1]) Diese Schaltung ist 1878 zuerst von Brush angewendet worden. Vorgeschlagen war sie schon 1871 von Sinsteden. In Deutschland wurde sie zuerst 1883 von E. Richter bei Siemens & Halske und fast gleichzeitig von Schuckert angewendet.

Nach einem Vorschlage (vom Jahre 1882) von Silvanus Thompson ist es für manche Zwecke vorteilhaft, den Nebenschluss, den die Wickelung der Feldmagnete bildet, vor und nach dem im äusseren Stromkreise der Maschine gelegenen Widerstande abzuzweigen.

Wir geben nachstehend in Fig. 234 eine schematische Darstellung dieser verschiedenen Schaltungen der Gleichstrommaschinen.

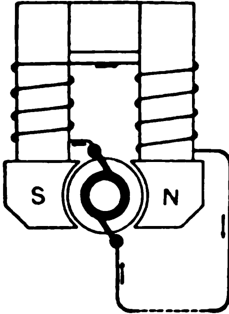


Fig. 234 A. Hauptstrommaschine.

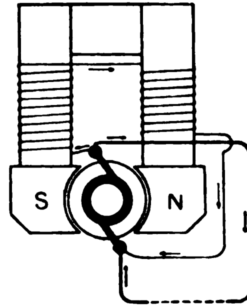


Fig. 234 B. Nebenschlussmaschine.

Für einzelne besondere Fälle wird auch der zur Erregung der Feldmagnete erforderliche Strom von einem zweiten in demselben Felde umlaufenden Anker oder nur einigen Ankerspulen entnommen, die zu diesem Zwecke besonders geschaltet werden.

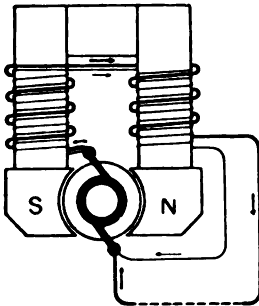


Fig. 234 C.
Gemischte Maschine mit Nebenschluss zur Ankerwickelung.

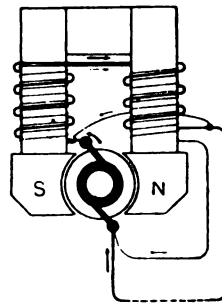


Fig. 234 D.
Gemischte Maschine mit Nebenschluss zum äusseren Widerstande.

Auch nach der Beschaffenheit des Ankers können die Maschinen in verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Zunächst sind dabei Anker mit in sich geschlossener und mit offener Wickelung zu unterscheiden.

Bei den Ankern mit geschlossener Wickelung sind sämtliche Windungen derart miteinander verbunden, dass dieselben

eine in sich geschlossene endlose Wickelung bilden, bei welcher zwischen den Stromabnehmern in keiner Lage entgegengesetzt gerichtete Induktionswirkungen entstehen. Der Stromwechsel vollzieht sich in den Windungen, die gerade keiner, oder nur einer schwächeren Induktionswirkung ausgesetzt sind.

Bei der offenen Wickelung werden nur diejenigen Leiterteile in den äusseren Stromkreis eingeschaltet, die gerade am stärksten induziert werden, während die übrigen Teile der Wickelung ungeschlossen bleiben und aus dem Stromkreise ausgeschaltet werden. Der ersten Gruppe gehören die weitaus meisten gebräuchlichen Maschinen an, während in die zweite z. B. die Anker der Maschinen von Brush und von Thomson-Houston und einiger Anderer gehören.

Der Form des Ankereisens nach unterscheidet man:

1. Ringanker, bei welchen die Ankerwickelung um einen eisernen Ring herumgelegt ist.

2. Trommelanker, bei welchen die Ankerwindungen um die Oberfläche eines eisernen Cylinders herumgelegt sind.

3. Polanker, bei welchen vorstehende Eisenzähne mit Windungen umgeben sind.

4. Scheibenanker, deren Windungen flach gegen eine Scheibe liegen, oder eine dünne Scheibe bilden.

Nach der Art der Unterbringung der Wickelung auf dem Ankereisen giebt es glatte Anker, bei denen die Drähte auf der Oberfläche aufliegen und Nuten- und Lochanker, bei welchen die Drähte in Vertiefungen oder Löchern untergebracht sind.

Endlich teilt man die Stromerzeugermaschinen auch noch nach der Zahl der vorhandenen Magnetfelder in zwei- und mehrpolige ein.

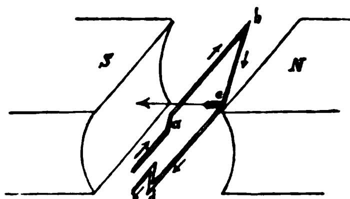
Die Ankerwickelungen können ferner aus einem oder mehreren Paaren parallel oder mehreren hintereinander geschalteten Stromkreisen bestehen.

2. Einfachste Dynamomaschinen und deren Bestandteile.

Dreht man zwischen den beiden Polen eines kräftigen Hufeisenmagneten eine einfache rechteckige Drahtschleife um eine Achse in der Richtung des Uhrzeigers, wie dies Fig. 235 A darstellt, so hat man in dieser Vorrichtung schon eine einfache Dynamomaschine vor sich.

Steht zunächst die rechteckige Schleife vertikal, ist also ihre Ebene zur Richtung der Kraftlinien senkrecht, so umfasst die Schleife die grösstmögliche Zahl von Kraftlinien. Diese Zahl nimmt fortwährend ab, wenn die Schleife im Sinne des Uhrzeigers gedreht

wird (Fig. 235 A). Nach der in Kap. VIII, Abschn. 2, S. 167 mitgeteilten Regel entsteht alsdann, wenn man in der Richtung der magnetischen Kraftlinien (von N nach S) auf die Stromschleife blickt, ein Strom, der die eingeschlossene Fläche in der Richtung des Uhrzeigers umfliesst; der Strom geht also von a über b und c nach d. Ist die Ebene der Schleife der Richtung der Kraftlinien parallel geworden, so gehen



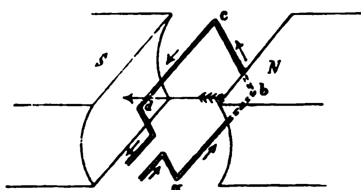
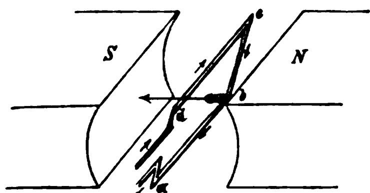


Fig. 235 A. Fig. 235 B.
Stromlauf in einer einzelnen Windung.

gar keine Kraftlinien mehr durch dieselbe hindurch. Wenn nun (Fig. 235 B) die Schleife die wagerechte Stellung überschritten hat, so beginnt die Zahl der Kraftlinien wieder zuzunehmen, und der Strom umfliesst die Fläche in entgegengesetzter Richtung des Uhrzeigers. In der Schleife selbst bleibt also die Stromrichtung ungeändert; der Strom verläuft von a über b und c nach d.



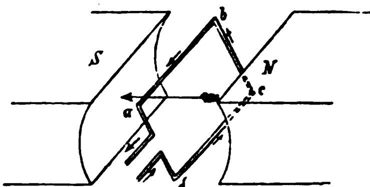


Fig. 235 C. Fig. 235 D.
Stromlauf in einer einzelnen Windung.

Wenn nun aber die Stromschleife vertikal geworden, also abermals senkrecht zur Richtung der Kraftlinien geworden ist, tritt nunmehr an die Stelle der Vermehrung eine Verminderung der von der Windung umschlossenen Anzahl von Kraftlinien. Die Richtung des Stromes kehrt sich daher (Fig. 235 C) alsdann um; der Strom läuft von d über c und b nach a und behält diese Richtung (vergl. Fig. 235 D) bei, bis die Schleife wieder in die Ausgangsstellung zurückgekommen ist. Beim Überschreiten der zur Richtung der Kraftlinien senkrechten Stellung tritt abermals ein Wechsel der Stromrichtung in dem Drahte ein.

Führt man die Enden der Drahtwindung (Fig. 236) zu zwei voneinander isolierten Schleifringen r′ r″, die durch aufliegende

Schleiffedern f′ f″ mit einer äusseren Leitung W in Verbindung stehen, so wird diese äussere Leitung W von Strömen abwechselnder Richtung, von Wechselströmen, durchflossen. Führt man dagegen von den Enden a und d der Stromschleife Drähte zu zwei Halbcylindern (Fig. 237), die durch Luftzwischenräume voneinander isoliert sind, und lässt auf diesen zwei Federn f′ und f″ schleifen, die durch eine äussere Leitung f′ W f″ miteinander verbunden sind, so ist auf dem Wege von der Ausgangsstellung bis zu der um 180° davon verschiedenen das Ende a mit der Feder f′ und das Ende d mit der Feder f″ in Verbindung. Wenn dann der Strom in der zweiten Hälfte der ganzen Umdrehung von d über c und b nach a fliesst, ist das Ende a mit der Feder f″ und das Ende d der Schleife mit der Feder f′ in Berührung. Die Stromrichtung im äusseren Stromkreise f′ W f″ bleibt daher dieselbe. Die beschriebene Vorrichtung ist nunmehr eine einfache Gleichstrommaschine. —

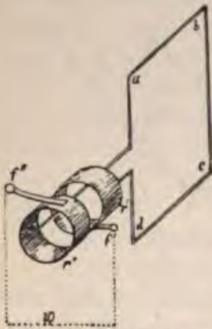


Fig. 236. Einfachste Wechselstrommaschine.

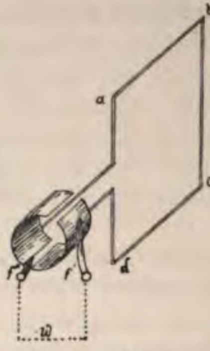


Fig. 237. Einfachste Gleichstrommaschine.

Die Vorrichtung, welche die Gleichrichtung der Ströme bewerkstelligt, heisst Stromwender oder auch Kommutator; bei zusammengesetzten Gleichstrommaschinen aber, bei welchen dieser Teil aus einer grossen Anzahl voneinander isolierter Metallstücke gebildet wird, heisst sie Stromsammler oder Kollektor.

Die Schleiffedern f′ f″, welche den Strom aufnehmen, heissen Stromabnehmer oder Bürsten.

Es bedarf kaum des besonderen Hinweises, dass man statt nur einer auch mehrere Windungen benutzen kann, um eine grössere Drahtlänge der Induktionswirkung auszusetzen, dass eine Vermehrung der Windungszahl aber keine grundsätzliche Änderung der vorstehenden Betrachtungen veranlassen würde.

Die in den vorstehenden Abbildungen vorliegende Anordnung würde als offene Ankerwickelung zu bezeichnen sein, weil die Wickelung nicht in sich geschlossen ist.

Der Strom, der in einer einfachen Stromschleife, die sich in einem Magnetfelde dreht, induziert wird, gleichviel ob sie aus einer einzelnen oder aus mehreren Windungen besteht, ist ein Wechselstrom, genau so beschaffen wie der Wechselstrom, dessen Entstehung

wir in Kap. VIII, Abschn. 4, S. 170 verfolgt haben. Seine Änderung mit der Zeit und in verschiedenen Stellungen im Magnetfelde kann somit durch eine Wellenlinie dargestellt werden (vergl. Fig. 238 A und auch Fig. 86, S. 170).

Wenn wir durch den Gebrauch eines Stromwenders (Fig. 237) in der zweiten Hälfte der Drehung die Stromrichtung umkehren, so fliesst nunmehr durch die äussere Schliessung W der Bürsten ein Strom, dessen Stärke zu verschiedenen Zeiten durch die Gestalt der Fig. 238 B veranschaulicht wird.

Solche Ströme würden, ihrer ungleichen Stärke wegen, für viele technische Verwendungen minder geeignet sein; deshalb muss man,

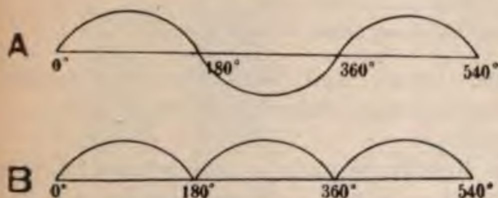


Fig. 238. Wechselstrom vor (A) und nach (B) der Kommutierung.



Fig. 239. Ringanker mit vier Spulen.

um geringere Änderungen der Stromstärke zu erhalten, statt einer mehrere Spulen und demgemäss einen mehrteiligen Stromwender zur Anwendung bringen.

Die Fig. 239 stellt z. B. einen Ringanker und Fig. 240 einen Trommelanker mit vierteiliger Wickelung und zugehörigem Kollektor dar.

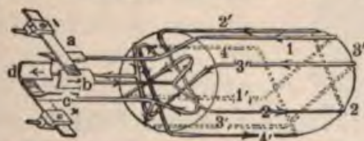


Fig. 240. Trommelanker mit vier Windungen.

In beiden Fällen liegen möglichst einfache Beispiele geschlossener Ankerwickelungen vor, weil auch, abgesehen von der Überbrückung der Segmente des Kollektors durch die Bürsten, die Wickelung einen in sich geschlossenen Leiter bildet. Sämtliche Spulen des Ringankers sind derart untereinander verbunden, dass dieselben eine endlose, um den eisernen Ankerkern gewickelte Spirale bilden (Spiralwickelung). Von jedem Kollektorsegment zweigen leitende Verbindungen nach zwei Spulen ab.

Während die einen Windungen senkrecht zur Richtung der Kraftlinien stehen, in ihnen also die Umkehrung der Stromrichtung

erfolgt, befinden sich die anderen Spulen in der Richtung der Kraftlinien. Die Ströme der Spulenpaare summieren sich, und es entsteht eine neue (in der Fig. 241 die oberste) Wellenlinie a b c d . . ., welche erkennen lässt, dass die Änderungen der Stromstärke nunmehr geringer geworden sind, wenn auch noch deutlich Maxima b d f . . . und Minima a, c, e, g zu unterscheiden sind.

Durch Anwendung einer noch erheblich grösseren Zahl von Spulen kann man es dann dahin bringen, dass der Strom nahezu gleichförmig wird. Da man aber gewisse Grenzen aus praktischen

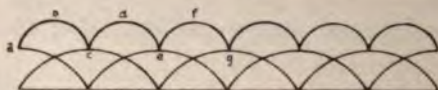


Fig. 241. Stromwellen bei einem Anker mit vier Spulen.

Gründen nicht überschreiten kann, sind selbst bei den besten Dynamomaschinen kleine regelmässige Pulsationen der EMK und Stromstärke stets wahrnehmbar.[1])

Während bei nur zwei Kollektorsegmenten die Schwankungen ± 50 % des Mittelwertes der Stromstärke betragen, sinken sie bei vier Kollektorsegmenten auf nur ± 14 % herab. Nachstehende kleine Tabelle giebt eine Übersicht über diese Schwankungen:

Anzahl der Kollektorsegmente	Schwankungen des Mittelwertes in Prozenten
2	± 50,0
4	± 14,0
10	± 2,4
12	± 1,7
15	± 1,1
20	± 0,6
24	± 0,4
30	± 0,3
36	± 0,2

Durch die Wirkung der Selbstinduktion werden diese Grössen sogar noch etwas verkleinert.

Für praktische Zwecke wird man von etwa 20 Spulen und Segmenten an die Unregelmässigkeiten vernachlässigen können.

Eine recht übersichtliche Darstellung der Wickelung eines solchen einfachsten Ankers, wie er in Fig. 239 und Fig. 240 abgebildet ist, erhält man, wenn man sich jede Spule durch eine einzelne Drahtwindung ersetzt, den Mantel des Ankers parallel der

---

[1]) Vielfach hört man dieselben an dem Tone zischender Bogenlampen und an dem singenden Tone, den grössere Elektromagnete wahrnehmen lassen, wenn man sie durch Maschinenstrom erregt; auch kann man die Stromschwankungen an einem Telephone beobachten, das man in die Nähe einer laufenden Dynamomaschine bringt.

Achse aufgeschnitten, und nunmehr die Mantelfläche in eine Ebene ausgebreitet denkt. Man kann alsdann noch die Polschuhe darunter zeichnen.

So giebt z. B. Fig. 242 eine solche Abwickelung des in Fig. 239 dargestellten Grammeringes. Die nur gestrichelt gezeichneten Verbindungsleitungen liegen auf der Innenseite des Ringes und sind deshalb Induktionswirkungen nicht ausgesetzt. Mit a, b, c, d sind die Kollektorsegmente und mit + und — die Bürsten bezeichnet.

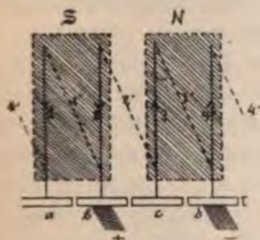


Fig. 242. Abwickelung des in Fig. 239 dargestellten Ringankers.

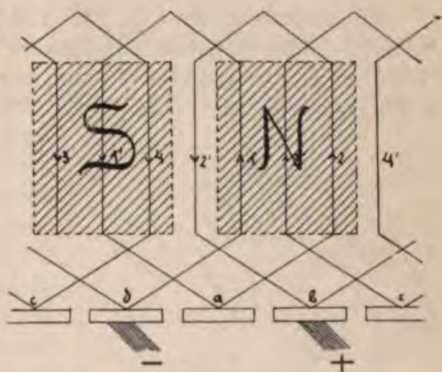


Fig. 243. Abwickelung des in Fig. 240 dargestellten Trommelankers mit Schleifenwickelung.

Die Windungen denken wir uns dann in einer geradlinigen Bewegung über den Polen hingleitend.

Wenn wir in ähnlicher Weise den Mantel des in Fig. 240 dargestellten einfachen Trommelankers abwickeln, erhalten wir das in Fig. 243 gegebene Bild. Die schrägen Linien sind hier die auf Vorder- und Rückfläche der Trommel gelegenen, der Induktion nicht ausgesetzten Leiter. In beiden Fällen handelt es sich um zweipolige Maschinen mit zwei parallel geschalteten Stromkreisen. Bei Fig. 240 sind diese Stromkreise die folgenden:

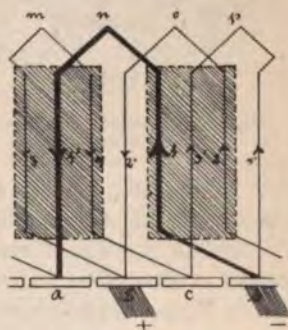


Fig. 244. Einfacher Trommelanker mit Wellenwickelung.

$$+\text{ Bürste}\left\{\begin{matrix} b - 3 - 3' - c - 4 - 4' - d \\ b - 2' - 2 - a - 1' - 1 - d \end{matrix}\right\} - \text{ Bürste}$$

In Fig. 243 bildet jeder Linienzug, wie man sieht, eine Schleife, man nennt daher eine solche Wickelung eine Schleifenwickelung.

Man könnte im vorliegenden Falle jedoch die induzierten Leitungen auch in anderer Weise verbinden, wie dies in Fig. 244 angedeutet ist. Dann bilden die Windungen keine Schleife, sondern

eine Wellenlinie, man nennt diese Art der Wickelung daher Wellenwickelung.[1]) Die Verbindungen m, n, o, p liegen auf der Rückseite.

Setzt man die hier gezeichneten Wickelungen zweimal, dreimal aneinander, so kommt man auf die Ankerwickelungen vierpoliger, sechspoliger Maschinen u. s. f.

3. Zweipolige Ringanker.

Die nachstehende Fig. 245 giebt ein schematisches Bild eines Pacinotti-Gramme'schen Ringankers[2]) mit 12 Spulen und Spiralwickelung. Jede Spule ist nur durch zwei Windungen dargestellt; in Wirklichkeit wird jede Spule aus beträchtlich mehr Windungen bestehen. Von jeder Verbindungsstelle zweier Spulen führt eine Abzweigung nach dem ebenfalls 12teiligen Kollektor. Die metallischen Segmente des Kollektors sind voneinander isoliert und nehmen an der Rotation mit teil. Die feststehenden Bürsten B′ und B″ nehmen den Strom ab. Wenn die Trennungsstelle zweier Kollektorsegmente an den Bürsten vorübergleitet, werden jedesmal zwei Spulen durch die Bürsten kurzgeschlossen.



Fig. 245. Zweipoliger Ringanker mit Spiralwickelung.

Gelangt z. B. die Trennungsschicht zwischen a und m vor B′, so befindet sich ebenso die trennende Schicht zwischen g und f vor der Bürste B″. Dann sind die Enden der Spulen 10 und ebenso die der Spule 4 unmittelbar miteinander durch die Bürsten B′ beziehentlich B″ durch einen Widerstand von verschwindender Grösse leitend verbunden, kurzgeschlossen. Während der geringen Dauer dieses Kurzschlusses werden diese Spulen jedesmal stromlos, und der Strom, der sie sonst durchfliesst, wechselt beim Durchgange durch diese Stellung seine Richtung.

Mit Schleifenwickelung, im Prinzip genau der Trommelwickelung von Hefner-Alteneck (vergl. Fig. 257, S. 378) entsprechend, haben nahezu gleichzeitig (1887) Wodicka und Swinburne eine andere Konstruktion der zweipoligen Ringanker angegeben, die in

---

[1]) Nach Fritsche, von dem wohl auch diese Art der graphischen Darstellung der Ankerwickelungen überhaupt zuerst angegeben worden ist.

[2]) Den Ringanker erfand im Jahre 1866 Pacinotti, unabhängig davon machte Gramme nochmals (1870?) dieselbe Erfindung.

Fig. 246 dargestellt ist. Die Zahl der Segmente des Kollektors ist nur halb so gross, als die Zahl der Spulen. Jedes Wickelungselement besteht aus zwei hintereinander geschalteten Spulen, deren induzierte EMKräfte sich summieren, und die sich auf nahezu diametral gegenüberliegenden Seiten des Ringes befinden.

Es ist Spule 1 mit 8′, 1′ mit 2, 2′ mit 3, 3′ mit 4 verbunden u. s. f. Denken wir uns nach dem von Fritsche angegebenen, bereits auf S. 361 beschriebenen Verfahren die Wickelung mit dahinter gezeichneten Polflächen in eine Ebene ausgebreitet, wobei wir jede Spirale durch einen Stab ersetzt denken, so erhalten wir das in Fig. 247 abgebildete Schema. Obgleich diese Wickelung von untergeordneter praktischer Bedeutung ist, teilen wir dieselbe mit, um an diesem Beispiel zu zeigen, dass auch am Ringanker nicht nur die Spiralwickelung, sondern auch andere Wickelungen (hier die Schleifenwickelung) möglich sind.

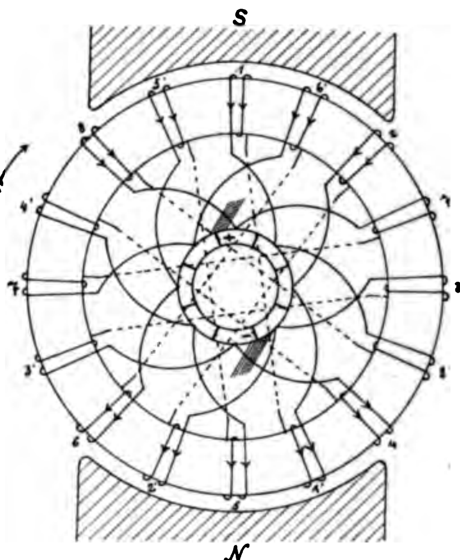


Fig. 246. Ringwickelung nach Wodicka.

Wir knüpfen die nächsten Betrachtungen wieder an den einfachen Grammering mit Spiralwickelung an.

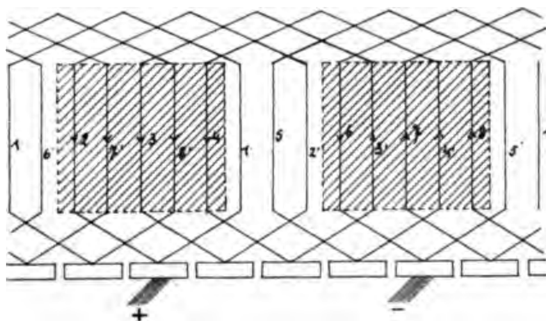


Fig. 247. Abwickelung der Wodickawickelung.

Die beiden Hälften der Bewickelung des Ankers einer zweipoligen Maschine müssen gleichen Widerstand, also gleiche Drahtlänge be-

sitzen, und gleich grosse, aber entgegengesetzte elektromotorische Kräfte müssen in ihnen induziert werden.

Während des Umlaufs des Ankers wachsen die Spannungsunterschiede zwischen benachbarten Segmenten des Kollektors von zwei Stellen aus, die sich (wenigstens bei zweipoligen Maschinen) diametral gegenüberliegen, nach beiden Seiten hin bis zu zwei in der Mitte dazwischenliegenden Stellen, in welchen die Induktion am stärksten ist.

An den Stellen, an welchen die Induktion am geringsten, also der Spannungsunterschied zwischen zwei benachbarten Abteilungen des Kollektors am kleinsten ist, werden die Stromabnehmer oder Bürsten angelegt. Diese Stellen liegen übrigens nicht genau in der Normalen zur Verbindungslinie der Magnetpole, sondern sie sind bei allen Stromerzeugern mit Eisenkernen im Anker stets um einen Winkel, der je nach der Konstruktion und der Stärke der Belastung der Maschine grösser oder kleiner ist (10° bis 30°), bei Stromerzeugern in der Drehrichtung des Ankers, bei Motoren in entgegengesetzter Richtung verschoben. Die Gründe für diese eigentümliche Erscheinung setzen wir weiterhin auseinander.

Man findet in der Praxis diese Stelle leicht, weil an ihr die Funkenbildung zwischen Bürsten und Kollektor am geringsten ist.

Von der Verteilung der freien Spannung auf dem Umfange des Kollektors giebt nebenstehende Fig. 248 eine Vorstellung. Man denkt sich dabei die negative Bürste mit der Erde verbunden, sodass an ihr die freie Spannung gleich Null ist. Der Anteil an EMK, den jede einzelne Spule liefert, ist gleich der Differenz zwischen zwei (den einzelnen Kollektorsegmenten entsprechenden) Ordinaten. Man erkennt leicht, zumal aus der zweiten Abbildung,

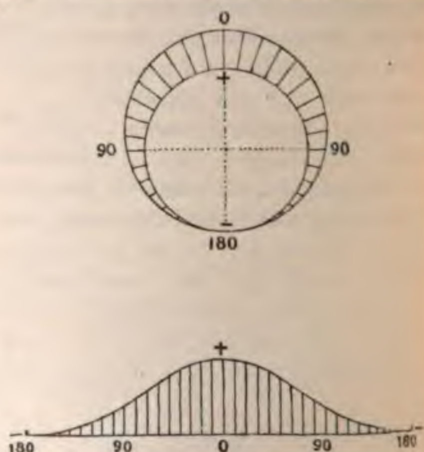


Fig. 248. Verteilung der Spannung um den Kollektor.

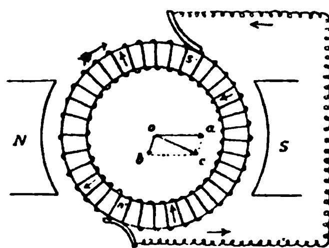
in der der Kollektorumfang in eine Gerade ausgebreitet ist, dass dieser Unterschied an den um 90° nach rechts und links von den Bürsten abstehenden (mit + und — bezeichneten) Stellen am grössten ist, d. h. an den Stellen, an welchen die Ebene der Ankerwindungen sich in der Richtung der Kraftlinien befindet.

In gleicher Weise ändert sich auch die Spannung an dem Umfange des Kollektors einer zweipoligen Trommelmaschine.

4. Die Bürstenverschiebung.

Da der Anker einer Dynamomaschine stets erhebliche Selbstinduktion besitzt, findet Maximum und Minimum der Stromstärke nicht genau zu derselben Zeit statt, zu der die induzierte E M K ihren höchsten oder tiefsten Wert erreicht, sondern es besteht zwischen beiden Wellen stets ein gewisser Phasenunterschied.[1]) Da wir aber die zu einer Spule gehörigen Kollektorsegmente gerade dann bei der Bürste vorübergleiten lassen wollen, wenn die Richtung des in dieser Spule erzeugten Stromes wechselt, so muss schon aus diesem Grunde eine Verschiebung der Bürsten im Sinne der Drehrichtung des Ankers stattfinden. Der Richtungswechsel des Stromes muss an einer solchen Stelle stattfinden, dass durch das magnetische Feld die Umkehr beschleunigt wird.

Da die Bürste ausserdem stets eine gewisse Breite hat, schliesst sie für einen Augenblick die ihr nächst gelegene Spule kurz, und es entsteht in der kurzgeschlossenen Spule wegen des Verschwindens bez. Umkehrens des Ankerstromes ein Induktionsstrom, der von der Stromstärke und Grösse der Selbstinduktion, also von der Windungszahl der Spule, dem Querschnitte und dem Magnetisierungszustande des Kernes und von der Umlaufsgeschwindigkeit abhängt.



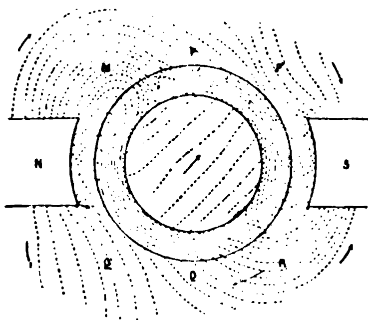


Fig. 249. Fig. 250.
Zusammenwirken des Feldmagnetismus und der Ankerströme.

Ausserdem aber wird die Ankerwickelung von dem Ankerstrome durchflossen, und dieser erzeugt in dem Eisenkerne des Ankers in jeder Hälfte zwei Pole, die sich in der Nähe der Berührungsstelle der Bürsten (vergl. Fig. 249) zu je zwei Doppelpolen oder Folge-

[1]) Der Begriff Phasenunterschied ist im Kap. VIII, Abschn. 8, S. 175, näher erläutert.

polen n′ und s′ zusammensetzen. Durch die Wirkung der Feldmagnete allein würde in der Richtung der Verbindungslinie der Pole derselben ein Feld entstehen, dessen Intensität und Richtung wir durch die Linie o a darstellen; ausserdem aber erzeugt der Ankerstrom ein Feld, das nach Grösse und Richtung durch o b dargestellt wird.

Nach dem, was wir früher (Kap. IV, Abschn. 10, S. 110) mitgeteilt haben, setzen sich zwei solche Magnetfelder zu einem einzigen zusammen, dessen Stärke und Richtung durch die Diagonale o c des aus o a und o b gebildeten Parallelogramms repräsentiert wird. (Fig. 249.)

Die Kraftlinien werden durch diese Verschiebung in ihrem Verlaufe erheblich abgelenkt, wie dies die Fig. 250 zeigt. Die Stellen, an welchen die Kraftlinien vollständig im Ringe verlaufen, liegen statt bei den Punkten P und Q nunmehr bei P′ und Q′, und die meisten Kraftlinien treten aus dem Ankereisen nicht mehr bei N und S aus, sondern die stärkste Induktion findet bei M und R statt. Das wirksame Feld wird durch diese Gegenwirkung des Ankers erheblich geschwächt und die Induktion in den Ankerwindungen vermindert, weil der Weg, den die Kraftlinien durch den Luftraum zu durchlaufen haben, verlängert und damit der magnetische Widerstand (vergl. Kap. VI, Abschn. 6, S. 134) des magnetischen Stromkreises vergrössert wird.

Bei Stromerzeugern wird dadurch die neutrale Zone in der Drehrichtung und bei Elektromotoren in dem der Drehrichtung entgegengesetzten Sinne verschoben. Da die schädliche Ankerrückwirkung und die Bürstenverschiebung von dem die Ankerwickelung durchfliessenden Strome herrührt, nehmen beide Erscheinungen mit wachsender Belastung zu.

Man kann sich auf folgende Weise ein anschauliches Bild von der Notwendigkeit der Bürstenverschiebungen machen, wenn man zunächst die magnetische Induktionswirkung der Feldmagnete und dann die der Ankerwickelung jede für sich betrachtet, und hierauf diese Wirkungen zusammensetzt.

In nebenstehender von Fischer-Hinnen herrührenden Fig. 251 stellt die Kurve I die Wirkung der Feldmagnete allein dar, die krumme Linie II bezieht sich auf die Ankerwickelung. Kurve III ist durch algebraische Summierung von I und II entstanden und entspricht annähernd den thatsächlichen Verhältnissen in dem Falle, dass die Maschine als Stromerzeuger thätig ist. Die Kurve IV gilt, wenn dieselbe Maschine als Elektromotor verwendet wird.

Wirkt das Feld allein, und dieser Fall findet statt, wenn der Anker stromlos, die Maschine also unbelastet ist, so liegt die neutrale Zone, d. h. die Stelle, an der die magnetische Induktion Null ist, in q.

Kommt jedoch die Ankerwirkung mit zur Geltung, so liegt bei dem Stromerzeuger die neutrale Stelle bei r. Wird dagegen die Maschine als Motor verwendet, behalten die Feldpole ihre Polarität, und dreht sich der Anker in demselben Sinne, so läuft der Strom entgegengesetzt. Die Kurve IV liegt im Verhältnis zum Punkte q symmetrisch zur Kurve III; die neutrale Zone befindet sich demnach beim Elektromotor in p.

In Wirklichkeit werden aber die Bürsten nicht beim Stromerzeuger in r und beim Motor in p angelegt, einmal, weil durch die Bürstenverschiebung selbst das Verhältnis der beiden wirksamen Felder in dem Sinne geändert wird, sodass eine Vergrösserung der



Fig. 251. Bürstenverschiebung bei Stromerzeugern und bei Elektromotoren.

Verschiebung eintreten muss, dann aber darf man die Bürste nicht an einer Stelle anbringen, an der die induzierte EMK Null sein würde, sondern man muss, um das durch die Selbstinduktion der durch die Bürste kurzgeschlossenen Spule verzögerte Verschwinden des Stromes zu beschleunigen, die Kommutation an einer Stelle veranlassen, an der bereits eine Induktion im Sinne der Umkehr der Stromrichtung stattfindet.

Beide Ursachen nötigen dazu, die Bürsten über die magnetische Neutralitätszone hinaus zu verschieben.

Immer bleibt aber bei Maschinen mit abwechselnden Polen auch das zusammengesetzte Kraftlinienfeld an zwei Stellen, die um eine Polteilung voneinander entfernt sind, von gleicher Grösse und Form und besitzt nur entgegengesetzte Richtung.

Man erkennt ausserdem aus der Figur, dass durch die magnetische Wirkung der Ankerwindungen die ursprünglich gleichmässige Verteilung der Kraftliniendichte in den Polschuhen verändert wird, beim Stromerzeuger wird am ablaufenden Polhorn die Felddichte verstärkt, am auflaufenden Polhorn jedoch geschwächt. (Vergl. auch Fig. 250.)

Beim Motor, auf den sich die Kurve IV bezieht, ist bei gleicher Drehrichtung des Ankers das Verhältnis umgekehrt.

Die Verminderung auf der einen Seite ist immer stärker, als die Vermehrung auf der anderen.

Die Änderung der Kraftliniendichte hat eine sehr bedeutende Änderung des magnetischen Widerstandes (wegen der Änderung der Permeabilität) im Gefolge.

Bezeichnet man die Anzahl der Kraftlinien, die durch die Bewickelung der Feldmagnete erzeugt werden, mit Φ und die vom Ankerstrome im Ankereisen erzeugte gesamte Kraftlinienzahl mit Φ_a, so ist die schädliche Rückwirkung des Ankers um so grösser, je grösser der Bruch $\frac{\Phi_a}{\Phi}$ ist. Man wird daher Φ möglichst gross, d. h. das Feld möglichst stark, und Φ_a dagegen möglichst klein wählen müssen. Da die Permeabilität des Eisens mit wachsender Sättigung rasch abnimmt, empfiehlt es sich, den Querschnitt des Ankereisens möglichst zu vermindern und die magnetische Sättigung desselben verhältnismässig gross zu wählen. Andere Gesichtspunkte, die weiterhin erwähnt werden, nötigen allerdings dazu, in dieser Beziehung nicht zu weit zu gehen. (Vergl. S. 370.)

5. Die Foucaultströme (Wirbelströme) und Verluste durch Hysteresis.

Die Kraftlinien, welche in der Ankerwickelung Induktionsströme erzeugen, dringen auch in das Ankereisen ein und induzieren daher auch in diesem gleichgerichtete Induktionsströme, die einen Energieverlust vorstellen und eine Erwärmung des Ankers zur Folge haben. Ebenso entstehen infolge der periodischen Schwankungen der Stromstärke im Anker und durch die Annäherung und Entfernung der Ankerdrähte und der Zacken und Nuten bei Nutenankern in den Polschuhen, die den Anker umfassen, zumal an den Spitzen der Polschuhe, schädliche Wirbelströme. Die zuletzt genannten Energieverluste sind unvermeidlich; den erstgenannten kann man jedoch durch passende Konstruktion der Eisenmassen des Ankers und der Polschuhe entgegenwirken.

Die Aufgabe, welche hierbei zu lösen ist, ist insofern nicht ganz leicht, als das Eisen des Ankers einerseits in der Richtung, in der sich schädliche Induktionsströme bilden würden, also in der Richtung der Ankerdrähte, möglichst in voneinander isolierte Teile zerlegt, anderseits dem Verlaufe der magnetischen Kraftlinien in ihrer Richtung ein thunlichst kleiner Widerstand entgegengestellt werden soll. Von verschiedenen Seiten ist diese Aufgabe auf verschiedenen Wegen gelöst worden. Die meisten Konstrukteure bilden den Kern des

Ankers aus dünnen Scheiben oder Ringen aus weichstem Eisenblech, die durch Blätter dünnen, paraffinierten Papiers oder Lack, oder selbst nur durch eine dünne Oxydschicht voneinander isoliert sind. Unter dem Drucke einer kräftig wirkenden hydraulischen Presse werden diese Blätter zu einer ziemlich kompakten Masse zusammengedrückt, ausserdem aber auch noch durch isolierte Bolzen zusammengehalten.

Gramme'sche Ringe werden auch wohl aus lackierten Drähten oder aus isolierten Blechstreifen, die spiralförmig zusammengewickelt werden, hergestellt.

Durch solche Mittel lassen sich die Foucaultströme im Ankereisen wenigstens so weit herabmindern, dass sich die Erwärmung desselben in annehmbaren Grenzen hält und der Arbeitsverlust nur Bruchteile eines Prozentes beträgt.

Selbstverständlich muss bei der Berechnung des magnetischen Widerstandes des magnetischen Kreises darauf Rücksicht genommen werden, dass wegen dieser Unterteilung des Ankereisens nur ein Teil des Ankerquerschnittes wirklich von Eisen ausgefüllt ist.

Um schädliche Induktionen in den zur Bewickelung des Ankers dienenden Kupferdrähten zu vermeiden, ersetzt man wohl auch sehr starke Drähte oder Stäbe durch ein Bündel voneinander isolierter Kupferdrähte.

Die zur Befestigung der Windungen auf dem Ankerkerne und des Ankers auf der Welle nötigen Metallstücke müssen immer derart angeordnet und gewählt werden, dass die Entstehung von Induktionsströmen in denselben thunlichst ausgeschlossen ist; dieselben dürfen also keine in sich geschlossenen Leiterkreise bilden. Für die Sterne, durch die man die Grammeringe auf der Welle befestigt, wählt man z. B. stets Bronzeguss, weil in Eisen die Kraftlinien leicht eindringen würden.

Die Stärke der Foucaultströme ist, wie die aller Induktionsströme, proportional der Geschwindigkeit des Ankers. Die Erwärmung durch solche schädliche Ströme ist daher, gemäss dem Joule'schen Gesetze, sehr nahe proportional dem Quadrate der Umlaufszahl.

Nach Fleming ist für Anker, die aus Blechscheiben von d *mm* Dicke hergestellt sind, der Wattverlust Q_W im Anker durch Wechselströme:

$$Q_W = \frac{0{,}16 d^2 \cdot \sim^2 \cdot \mathfrak{B}^2 \cdot V}{10^{12}} \quad \ldots\ldots\ 1)$$

wenn $\sim$ die Periodenzahl, $\mathfrak{B}$ die Kraftliniendichte, V das Volumen des Ankereisens in *ccm* ist. Die Formel gilt nur für Werte von $d < 0{,}1$ *cm*.

Durch die Belastung wächst der Wechselstromverlust. Man kommt nach Arnold der Wahrheit ziemlich nahe, wenn man die

Verluste im Eisen bei Belastung Q'_W, im Verhältnis der Quadrate der Sättigungen im Luftzwischenraume vergrössert:

$$Q'_W = Q_W \cdot \left(\frac{\mathfrak{B}'_\mathfrak{L}}{\mathfrak{B}_\mathfrak{L}}\right)^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 2)$$

Da das Eisen des Ankers bei jedem Umlaufe so viele vollständige magnetische Kreisprozesse durchläuft, als Polpaare vorhanden sind, so tritt auch ein Energieverlust durch Hysteresis infolge der Umkehrung des Magnetismus (vergl. Kap. V, Abschn. 16, S. 121) ein. Dieser Verlust ist der Anzahl der Wechsel des magnetischen Zustandes, somit der ersten Potenz der Umlaufsgeschwindigkeit proportional.

Nach einer von Steinmetz gegebenen empirischen Näherungsformel ist der infolge der Hysteresis auftretende Verlust Q_H gemessen in Watt:

$$Q_H = \eta \cdot V \cdot \mathfrak{B}^{1,6}_{max} \cdot \sim \cdot 10^{-7}, \quad . \; . \; . \; . \; . \; 3)$$

wenn V das Eisenvolumen in *ccm*, $\mathfrak{B}_{max}$ die grösste Kraftliniendichte ist, die während des Kreisprozesses im Eisen vorkommt, und η ein von der Beschaffenheit des Eisens abhängiger Koëffizient ist, dessen Wert für Ankerbleche etwa zwischen 0,002 und 0,004 liegt. Die Grösse $\sim$ ist die Zahl der Perioden, während deren ein vollständiger Kreisprozess durchlaufen wird, und beträgt:

$$\sim = \frac{u \cdot p}{60} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 4)$$

wenn u die Zahl der Umläufe des Ankers in der Minute und p die Anzahl der vorhandenen Polpaare bezeichnet.

Um die Verluste durch Hysteresis möglichst gering zu machen, empfiehlt es sich daher, für den Anker möglichst gute, magnetisch weiche Bleche zu verwenden und die Kraftliniensättigung im Ankereisen nicht zu hoch werden zu lassen. Die Hysteresisverluste sollen bei guten Maschinen 2% nicht übersteigen.

6. Mehrpolige Maschinen mit Parallelschaltung in der Ringwickelung.

Für grössere Maschinen ist es oft erwünscht, grössere Anker zu verwenden und diese mit geringeren Winkelgeschwindigkeiten sich bewegen zu lassen; dies kann dadurch erreicht werden, dass man die Spulen während einer Umdrehung durch mehrere Kraftlinienfelder hindurchführt. Alsdann wechselt die in den Ankerdrähten induzierte EMK während einer vollen Umdrehung mehrmals ihr Vorzeichen. Auf diese Weise ist man zur Konstruktion mehrpoliger Maschinen gekommen. Die am Umfange des Ankers aufeinanderfolgenden Pole erhalten abwechselnd entgegengesetzte Polarität.

Während man früher selbst ziemlich grosse Maschinen zweipolig ausführte, werden jetzt sogar kleinere Maschinen meist mindestens vierpolig konstruiert, und nur bei den kleinsten Maschinen und Elektromotoren hat man die zweipolige Anordnung, und da nicht einmal ausschliesslich, beibehalten.

Eine einfache Anordnung mit vier Polen und Spiralwickelung zeigt die nachstehende Fig. 252. Die Bürsten b_1 und b_3 haben alsdann gleiche elektrische Spannung und ebenso die Bürsten b_2 und b_4 unter sich gleiche, der der anderen Bürsten entgegengesetzte. Die gleichnamigen, sich diametral gegenüberstehenden Bürsten sind mit je einer Polklemme der Maschine verbunden. Die vier Teile des Ringes werden durch die Bürsten parallel geschaltet. Es bedarf kaum des Hinweises, dass man in gleicher Weise 6, 8, 10 . . . . . 2p Pole um die Peripherie des Ankers herum anordnen kann.

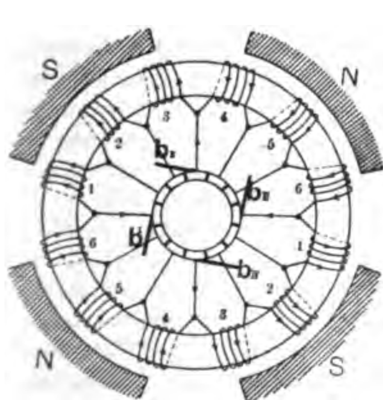


Fig. 252. Vierpolige Ringwickelung mit Parallelschaltung.

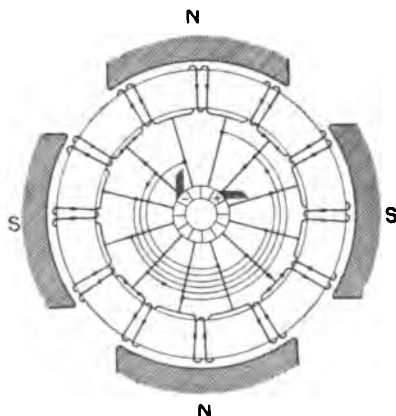


Fig. 253. Vierpoliger Anker mit Parallelschaltung und zwei Bürsten.

Da es gelegentlich wünschenswert erscheint, mit nur zwei Bürsten auszukommen, haben Gülcher und Mordey die gegenüberliegenden Spulen, welche gleiches Potential besitzen, oder die gegenüberliegenden Kollektorsegmente durch Leiter dauernd miteinander verbunden. Fig. 253 zeigt die Art der Verbindung. Selbstverständlich können die hier angedeuteten Verbindungen auch innerhalb des Kollektors liegen. Es sind bei den Ankern solcher Maschinen jedesmal nur zwei Bürsten erforderlich, die in einem Winkel von $\frac{360}{2p}$ Grade voneinander abstehen, wenn p die Anzahl der Polpaare bezeichnet. Der Kollektor muss, um dieselbe Auflagefläche für die Bürsten zu haben, doppelt, beziehentlich p mal so breit gewählt werden.

Für besondere Fälle kann man diese Wickelung dadurch vereinfachen, dass man je eine der zwei parallel geschalteten Spulen weglässt und die Wickelung, die nun die doppelte Stromstärke führt, aus zweimal so starkem Draht herstellt.

Die Spannung der Maschine bleibt trotz der halben Spulenzahl dieselbe, ebenso die Zahl der Kollektorsegmente; letztere ist alsdann doppelt so gross, als die Zahl der Spulen. Man wickelt alsdann nur die erste, die dritte, fünfte Spule u. s. f. Damit man die Wickelung ausführen kann, muss, wie leicht ersichtlich ist, die Zahl der übrig bleibenden Spulen ungerade sein.

Die Fig. 254 stellt eine solche Anordnung dar, wie sie besonders für Strassenbahnmotoren jetzt vielfach angewendet wird.[1]) Der Spannungsunterschied zwischen zwei benachbarten Spulen und zwei benachbarten Kollektorsegmenten beträgt $\frac{2\,E}{S}$, wenn S die Zahl der Spulen und E die E M K bedeutet, die in der Wickelung induziert wird.

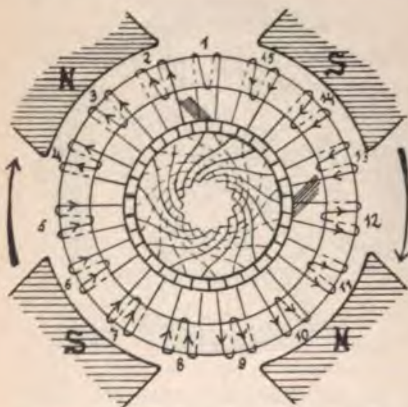


Fig. 254. Oerlikonschaltung für Strassenbahnmotoren.

Die bei solchen Anordnungen unvermeidliche Überkreuzung von Drähten kann bei Verletzungen der Isolation leicht zu Berührungen von Drähten mit sehr verschiedenen Spannungen führen, die für die Ankerwickelung nachteilig werden können. Auch vermehren solche Drähte den Widerstand etwas und können leicht, weil sie in der Nähe starker Magnetfelder bewegt werden, zur Entstehung schädlicher Induktionsströme Anlass geben.

Neuerdings hat man auch Einrichtungen getroffen, durch die mehrere Bürsten gleichzeitig angelegt und abgenommen werden können, und hat es zweckmässiger gefunden, mehrere Bürsten nebeneinander an dasselbe Kollektorstück anzulegen, um die Berührungsfläche zu vergrössern, und um eine dieser Bürsten abnehmen und vorrichten zu können, ohne dabei den Strom zu unterbrechen.

7. Mehrpolige Ringanker mit hintereinander geschalteten Wickelungen.

Bei mehrpoligen Maschinen, die besonders hohe Spannungen, oder die eine gewisse Spannung bei niedrigerer Umlaufszahl des

[1]) Seit 1892 von der Maschinenfabrik Oerlikon vielfach verwendet.

Ankers liefern sollen (langsam laufende Maschinen), können nach einem Vorschlage von Desrozier die Spulen in nur zwei parallelen Ankerstromkreisen hintereinander geschaltet werden. Alsdann verwendet man aber bei einer Maschine mit p Polpaaren nicht mehr 4p, sondern $4p + 1$ Spule und $8p + 2$ Kollektorsegmente. In der untenstehenden Fig. 255 ist z. B. $p = 2$; die Maschine ist somit vierpolig, die Zahl der Spulen beträgt 9, die der Kollektorsegmente 18. Es sind nur zwei Bürsten vorhanden, die um einen Winkel von $\frac{360}{2p} = 90$ Grad voneinander abstehen.

Eine etwas anders eingerichtete vierpolige Serienwickelung, die von Perry angegeben worden ist, zeigt Fig. 256.

Der Wickelungsschritt, d. h. die Anzahl Spulen, über die man hinwegschreitet, bis man die Verbindung mit einer anderen Spule

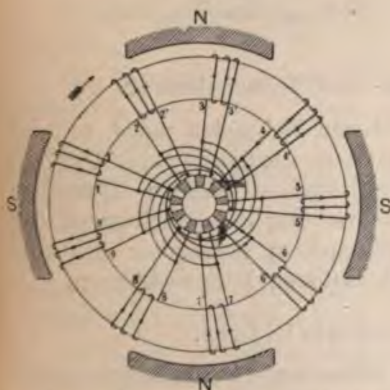


Fig. 255. Ringanker mit Reihenschaltung nach Desrozier.

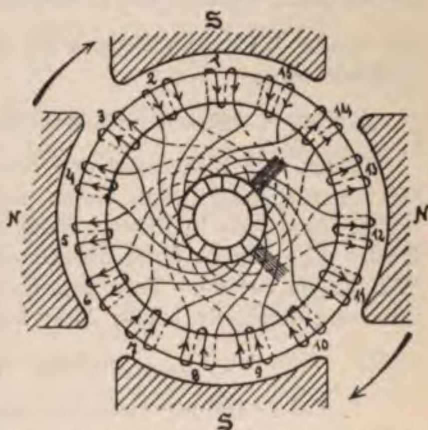


Fig. 256. Ringwickelung mit Reihenschaltung nach Perry.

herstellt, der Wickelungsschnitt y ist in diesem Falle 7. Die Zahl S der Spulen beträgt 15; ebenso gross ist die Anzahl der Kollektorsegmente.

Es ist leicht einzusehen, dass die in Fig. 255 und 256 dargestellten Wickelungen sich auch auf mehr als vierpolige Maschinen mit 2p Polen anwenden lassen, wenn man den Wickelungsschnitt y

$$y = \frac{S \pm 1}{p}$$

macht.[1])

[1]) Auf die von Arnold entdeckte und in die Praxis eingeführte gemischte Schaltung, bei der Gruppen von Ankerstromkreisen parallel und diese Gruppen hintereinander geschaltet werden, gehen wir später bei Besprechung der allgemeinen Schaltungsformel, Kap. XIX, Abschn. 13, S. 388, etwas näher ein. Für Ringanker werden dieselben in der Praxis nur selten verwendet.

8. Ankerwiderstände mehrpoliger Maschinen.

Man erkennt sofort, dass bei zweipoligen Maschinen die beiden Hälften der Ankerwickelung durch die Bürsten parallel geschaltet werden, sodass also, wenn der Widerstand des Ankerdrahtes gleich w ist, zwei Hälften vom Widerstande $\frac{w}{2}$ gleichzeitig von dem Strome durchflossen werden; der Widerstand des Ankers zwischen den Bürsten beträgt nur $\frac{w}{4}$. Ebenso verhält es sich, wenn, wie in den zuletzt beschriebenen Fällen (Fig. 255 und 256), die einzelnen Spulen bei mehrpoligen Wickelungen hintereinander geschaltet sind.

Bei einer Maschine mit p Polpaaren, deren einzelne Teile parallel geschaltet sind, wie in den Fällen, die in Fig. 252 und 253 dargestellt sind, beträgt der innere Widerstand $\frac{w}{(2p)^2}$, wenn wiederum mit w der Widerstand des auf den Anker gewickelten Drahtes bezeichnet wird.

9. Vergleich zwischen Ring- und Trommelanker.

Wenn wir bisher bei den behandelten Beispielen meist an den Grammering angeknüpft haben, so hatte dies lediglich seine Ursache darin, dass sich in diesem Falle der Stromlauf leichter übersehen lässt. Ehe wir zu einer näheren Beschreibung der Schaltungen der Windungen bei dem Trommelanker übergehen, wollen wir die Vorteile und Nachteile beider Ankerkonstruktionen kurz aufführen.

a) Vorteile des Gramme-Ringes.

1. Die Spannung zwischen zwei nebeneinander liegenden Ankerdrähten ist, abgesehen von den in Fig. 255 und Fig. 256 mitgeteilten Schaltungen, selbst im ungünstigsten Falle nur $\frac{1}{n}$ von der Bürstenspannung, wenn n Kollektorsegmente vorhanden sind. Man wird daher für Maschinen zur Erzeugung hoher Spannungen dem Ringanker den Vorzug geben (bei besonders guter Arbeit kann man unbedenklich bis 2000 ja sogar bis 3000 Volt gehen).

2. Man kann die Ringe von grossem Durchmesser wählen und dann leicht bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit der rotierenden Ankerdrähte mit niedrigeren Umlaufszahlen auskommen.

3. Da die einzelnen Spulen getrennt nebeneinander liegen, sind Ausbesserungen verhältnismässig leicht ausführbar.

4. Die zur Befestigung des Ringes auf der Welle nötigen Speichen dienen gleichzeitig als Mitnehmer für die Ankerdrähte. Eine besondere Befestigung der Drähte auf dem Ringe ist daher entbehrlich.

5. Für Anker mit sehr wenig Windungen kann ohne weiteres die Zahl der Metallstreifen des Kollektors gleich der der Ankerwindungen gemacht werden.

b) Nachteile des Gramme-Ringes.

1. Bei höheren magnetischen Sättigungen schliessen sich (vergl. Fig. 250) auch Kraftlinien innen durch den Ring, und diese rufen in den innerhalb des Ringes gelegenen Teilen der Ankerwindungen Induktionswirkungen hervor, die gleiche Richtung haben, wie die an der Aussenfläche gelegenen, diesen also entgegenwirken und sie zum Teil aufheben.

2. Selbst wenn bei schwächeren Sättigungen keine Kraftlinien sich durch den inneren Luftraum schliessen, tragen doch die innerhalb des Ringes gelegenen Drähte nichts zur Erhöhung der E M K bei, wirken vielmehr nur als schädlicher Widerstand und erhöhen die nachteilige Rückwirkung des Ankers auf das Magnetfeld.

3. Der gesamte Ankerquerschnitt wird nur sehr ungünstig ausgenützt.

4. Das Durchstecken des Drahtbündels durch den inneren Hohlraum erschwert das Wickeln bei Ankern mit vielen Windungen in jeder Spule.

5. Bei Hintereinanderschaltung der Spulen, auch bei der Schaltung von Mordey, kommen an der Stirnfläche des Ankers auch Kreuzungen von Drähten vor, die sehr verschiedene Spannungen führen. Wird nun der Maschinenstrom durch einen Zufall plötzlich unterbrochen, so entstehen infolge der kräftigen Induktion (Extrastrom) vorübergehend sehr hohe Spannungen, die zu einem Durchschlagen der Isolation zwischen naheliegenden Drähten an den Kreuzungsstellen Anlass geben können.

c) Vorzüge des Trommelankers.

1. Bei dem Trommelanker sind die Längen der Drahtstücke, die nicht an den nützlichen Induktionswirkungen teilnehmen, geringer als beim Ringanker. Der innere Widerstand und die Abmessungen des Ankers werden dadurch verkleinert. Auch der eigene Magnetismus und die schwächende Rückwirkung des Ankers auf das Magnetfeld wird dadurch vermindert.

2. Der Weg, den die magnetischen Kraftlinien im Ankereisen zu durchlaufen haben, ist kürzer, der magnetische Widerstand daher geringer, als beim Ringanker.

3. Der Ankerquerschnitt wird in höherem Grade ausgenützt. Ein Trommelanker kann aus den unter 1. bis 3. angeführten Gründen um ungefähr 10% bis 15% kleiner gewählt werden als ein Ringanker für gleiche Leistung.

4. Für mehrpolige Maschinen lässt sich die Wickelung des Trommelankers leicht für nur zwei Bürsten ausführen (vergl. weiterhin Fig. 265 und Fig. 268).

d) Nachteile des Trommelankers.

1. Wegen des relativ geringeren Durchmessers des Trommelankers sind zumeist höhere Umlaufszahlen nötig, um unter sonst gleichen Umständen dieselbe Spannung zu erreichen.

2. Bei nötig werdenden Ausbesserungen muss meist der ganze Anker abgewickelt werden, weil die Spulen zum Teil übereinander greifen.[1]) Die Ausführung einer guten Trommelwickelung erfordert an sich grössere Umsicht und Geschicklichkeit des Arbeiters, als die Wickelung des Ringankers.

3. Wenn nicht Nuten auf dem Anker vorhanden oder (wie bei manchen Maschinen von Oerlikon und Anderen) die Ankerdrähte in Löchern des Ankereisens untergebracht sind, müssen durch besondere Vorsprünge oder Mitnehmer die Drähte am Rutschen auf der Ankeroberfläche verhindert werden. Bei grösseren Maschinen genügt die Reibung der Ankerdrähte auf der Oberfläche des Kernes nicht zum Festhalten.

4. Zwischen den jeweilig an der neutralen Zone gelegenen Drähten herrscht der volle Spannungsunterschied zwischen den Bürsten. Die Isolation der Drähte muss daher mit besonderer Sorgfalt gewählt werden, und es empfiehlt sich deshalb nicht Trommelanker für höhere Spannungen als 1000 Volt zu verwenden.

Man erkennt hiernach leicht, dass jede der beiden wichtigsten Ankertypen nur für gewisse Fälle der anderen überlegen ist, zumeist aber besondere Rücksichten für die eine oder die andere Form bei der Entscheidung den Ausschlag geben werden.

10. Wickelung und Schaltungen am zweipoligen Trommelanker.

Als Kerne der Trommelanker dienen meist Cylinder, die man aus ringförmigen Blechscheiben aufbaut, welche durch Lack oder dünnes paraffiniertes oder mit Lack getränktes Papier voneinander isoliert und unmittelbar auf die Welle oder auf ein Zwischenstück aufgereiht werden. Die Drehachse trägt auch gleichzeitig den Kollektor. Die äusseren Enden der Cylinder werden durch Platten aus einem festen, isolierenden Materiale (Holz, Hartgummi) oder auch durch Messing- oder Rotgussstücke begrenzt. Diese Endscheiben

[1]) Ausgenommen von diesem Nachteil ist die von Eickemeyer zuerst vorgeschlagene Art der Trommelwickelung, die neuerdings auch in Deutschland mehrfach benutzt wird.

tragen Vorsprünge, welche als Mitnehmer für den aufzuwickelnden Draht dienen, wenn nicht, wie dies neuerdings fast stets geschieht, die Ankerdrähte in Nuten eingebettet werden, die in die Oberfläche des Ankereisens eingefräst sind.

Wie schon Fig. 234 zeigt, werden in den beiden Hälften einer Windung, die als Rechteck den Kern umfasst, Ströme induziert, die sich summieren; man kann die beiden Enden einer Windung oder einer aus mehreren Windungen bestehenden Spule mit zwei aufeinander folgenden Segmenten des Kollektors verbinden. An der Induktion nehmen die auf der Stirn- und Rückfläche der Trommel gelegenen Drahtstücke nicht teil. Um diese nur als schädlicher Widerstand wirkenden Stücke in ihrem Verhältnis zur gesamten Länge zu verkleinern, machte man früher die Trommeln verhältnismässig sehr lang. Durch die starken Zugkräfte, die bei stark belasteten Maschinen an den Drähten angreifen, kamen jedoch alsdann häufig Drahtbrüche vor, sodass man neuerdings kleinere Längen der Trommel bevorzugt.

Die erste Trommelwickelung nach dem Siemens'schen T-Anker mit zweiteiligem Kollektor hat im Jahre 1872 v. Hefner-Alteneck angegeben.

Jeder Spule entspricht ein Kollektorsegment und jedes Segment steht mit zwei Spulen derart in Verbindung, dass alle Spulen eine in sich geschlossene Wickelung bilden, die durch zwei gegenüberstehende Stromabnehmer in zwei parallel geschaltete Hälften geteilt wird.

Jede Windung oder Spule füllt zwei Zwischenräume aus, die zwischen den als Mitnehmer dienenden Vorsprüngen des Ankers liegen; man wird daher, wenn ebensoviele Vorsprünge als Segmente vorhanden sind, auf oder neben die erste Drahtlage noch eine zweite legen müssen, um alle Kollektorsegmente mit Enden von Windungen zu versehen.

Will man nur eine Drahtlage auf den Ankerkern aufbringen, so bringt man doppelt so viele Mitnehmer auf dem Anker an, als Kollektorsegmente vorhanden sind, überspringt bei der ersten Auflegung von Draht je einen Zwischenraum und bewickelt diesen erst, wenn man alle ungeradzahligen Zwischenräume mit Draht bedeckt hat.

Umstehende Fig. 257 stellt einen solchen Anker dar, und zwar sind auf dem Umfange der Trommel 16 Wickelungsfelder 11′, 22′ bis 88′, und auf dem Kollektor somit 8 Segmente a, b . . . . h vorhanden. 1, 2, 3 . . . 8 sind die Spulenanfänge, 1′, 2′ . . . . 8′ die Spulenenden.

Es ist gleichgiltig, ob man, von 1 ausgehend, das bei 1′ zurückkommende Ende rechts oder links mit den nächsten Segmenten verbindet und in dem einen oder anderen Sinne fortschreitet. Man

erhält je nachdem eine **rechtsgängige** oder **linksgängige** Schaltungsrichtung. Während Fig. 257 den Anker mit rechtsgängiger

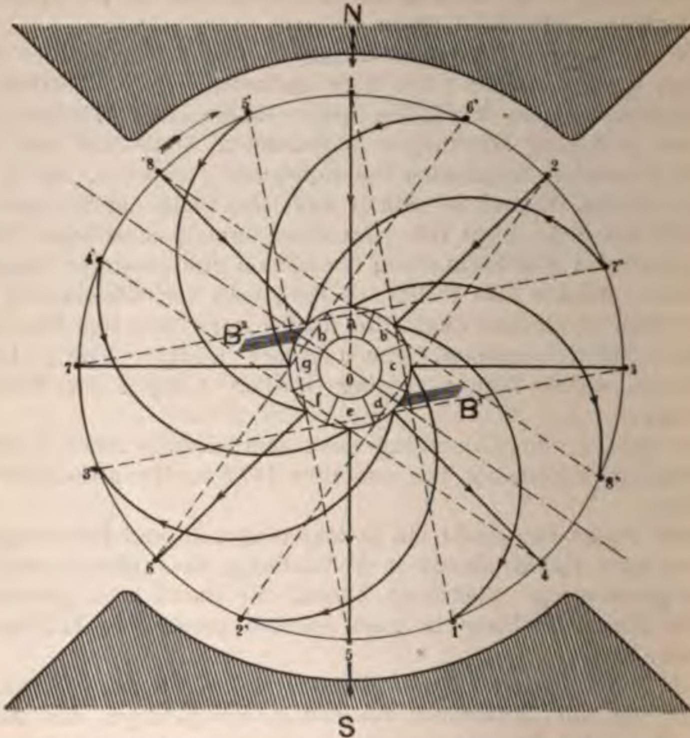


Fig. 257. Rechtsgängige Ankerwickelung nach von Hefner-Alteneck.

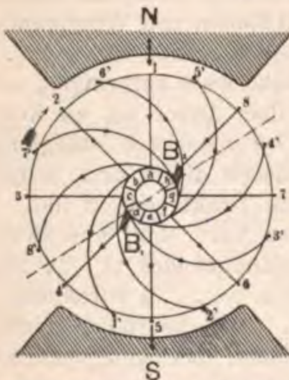


Fig. 258. Linksgängige Trommelwickelung.

Schaltung zeigt, zeigt Fig. 258 denselben Anker in etwas vereinfachter Darstellung mit linksgängiger Schaltung dar. Dreht sich der Anker in der Richtung des Uhrzeigers, und liegt oben ein Nordpol, so liegt bei rechtsgängiger Schaltung die positive Bürste links; bei linksgängiger Schaltung ist dagegen die negative Bürste die linke.

Will man vier Drahtlagen auf dem Anker unterbringen, so wählt man nur halb so viel Zwischenräume zwischen den Mitnehmern, als Kollektorsegmente vorhanden sind, und umwickelt den Anker viermal.

Die übereinander liegenden Drähte auf der Vorder- und Hinterfläche des Trommelankers bilden zwei Wülste.

Um Verschiebungen der Drähte auf der Trommel zu verhindern, umschlingt man den fertig gewickelten Anker aussen noch an drei oder vier Stellen mit Bändern oder dünnem Draht, den man senkrecht zur Achse rund um den Anker legt, tränkt die Drahtumhüllung bei der Wickelung mit einem Lack, der auch bei höherer Temperatur fest bleibt (Schellack in Alkohol); man vergrössert dadurch die Reibung, dass man die Windungen untereinander verkittet.

Will man, nachdem eine Spule gewickelt ist, zu dem benachbarten Segmente des Kollektors zurückkehren, so muss man mit dem einen Drahte ziemlich einen ganzen Durchmesser auf der Vorderfläche zurücklegen. Um dies zu vermeiden, kann man Anfang und Ende der Spule mit zwei benachbarten Kollektorsegmenten verbinden, die um 90° gegen die Ebene der Spule gedreht sind. Dann werden die Bürsten nicht mehr mit einem Verschiebungswinkel von 10° bis 30° gegen die Normale zur Richtung der Kraftlinien, sondern unter demselben Winkel gegen die Kraftlinienrichtung selbst angelegt werden; Fig. 259 stellt z. B. eine solche Wickelung mit 8 Spulen dar. Die gestrichelten Linien deuten die auf der Hinterfläche des Ankers verlaufenden Teile der Windungen an.

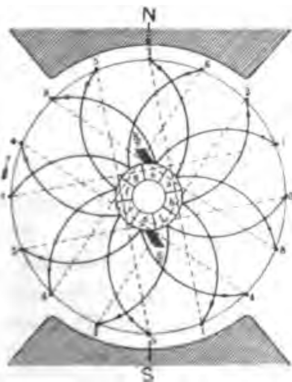


Fig. 259.
Symmetrische Trommelwickelung.

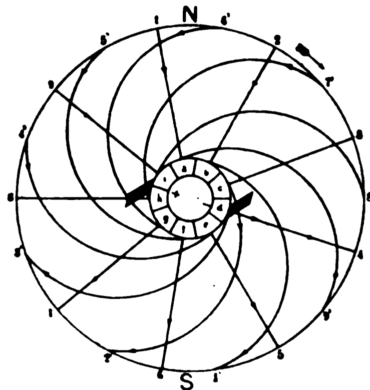


Fig. 260.
Ungeradzahlige Edisonwickelung.

Eine kleine Änderung in der Anordnung der Ankerwickelung hat Edison dadurch bewerkstelligt, dass er die Anzahl der Ankerspulen und des Kollektors ungeradzahlig wählt. Steht dann bei zweipoligen Maschinen die Mitte des Kollektorstreifens (z. B. d in Fig. 260) der Bürste gegenüber, so verlässt auf der anderen Seite die Bürste den Streifen (h), den sie soeben berührte. Man erreicht

dadurch, dass immer nur eine Spule auf einmal (im vorliegenden Falle 88′), statt, wie gewöhnlich, zwei gegenüber liegende Spulen, gleichzeitig durch die Bürsten kurzgeschlossen werden.

11. Mehrpolige Trommelanker.

Auch für mehrpolige Maschinen lassen sich leicht Trommelanker wickeln. Die Spulenzahl muss dann ein ganzes Vielfaches der halben Anzahl der Pole sein. Bei Ankern, deren Spulenzahl ein ungerades Vielfaches der Polzahl ist, kommt der soeben erwähnte Vorteil zur Geltung, dass nur halb so viele Spulen (p, wenn 2 p Pole vorhanden sind) gleichzeitig kurzgeschlossen werden, als wenn die Anzahl der Spulen ein geradzahliges Vielfaches der Polzahl ist. Die obenstehende Fig. 261 zeigt die Schaltung des Ankers einer

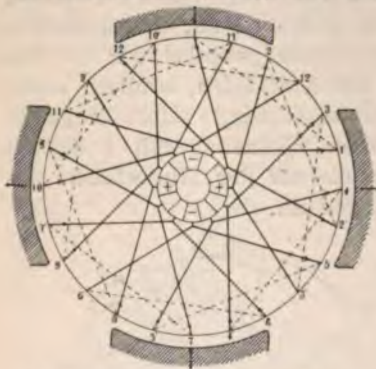


Fig. 261. Vierpoliger Trommelanker mit Schleifenwickelung und Parallelschaltung.

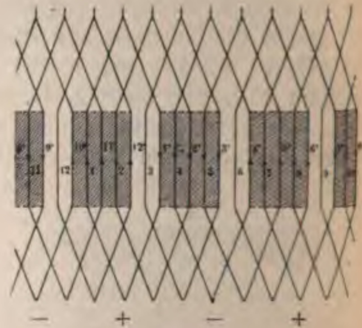


Fig. 262.

vierpoligen Maschine mit 24 Drähten oder 12 Spulen auf der Peripherie und einem 12teiligen Kollektor, an dem 4 Bürsten anliegen. Durch die Bürsten werden die 4 Viertel des Ankers parallel geschaltet.

Auch hier sind die Spulenanfänge mit 1, 2, 3 . . ., die Enden der Spulen mit 1′, 2′, 3′ . . . bezeichnet. Die auf der Vorderseite der Trommel liegenden Drähte sind ausgezogen, die auf der Rückseite befindlichen gestrichelt dargestellt.

In der unmittelbar daneben liegenden Fig. 262 ist nach der Darstellung, wie sie zuerst Fritsche angegeben hat, der Mantel der Trommel abgewickelt und in die Papierebene ausgebreitet gezeichnet. Die Pole sind darunter als schraffierte Flächen eingetragen. In beiden Zeichnungen sind die Stromrichtungen durch Pfeile angedeutet.

Eine andere Anordnung mit Parallelschaltung der 4 Viertel der Ankerwickelung — und verkürztem Wicklungsschritt bei Schleifen-

wickelung hat Swinburne angegeben; besonders von Thury ist dieselbe oft angewendet worden. Fig. 263 und Fig. 264 stellen diese Wickelung dar; die erste Figur zeigt die Vorderseite des Ankers, die andere den in eine Ebene abgewickelten Trommelumfang mit darunter schraffiert gezeichneten Polflächen. Diese Wickelung hat den Vorzug, dass Drähte mit sehr verschiedenen Spannungen nicht so oft aneinander vorübergeführt zu werden brauchen, wie dies bei dem zuvor dargestellten Beispiel der Fall ist, die Querverbindungen beanspruchen weniger Drahtlänge, und die Ankerrückwirkung ist bei dieser Wickelungsart kleiner.

Wenn man in den Abwickelungen der Mantelflächen Fig. 262 und Fig. 264, den Pfeilen nachgehend, den Weg verfolgt, den die Ströme nehmen, so erkennt man sofort, dass in beiden Fällen diese Wege Schleifen bilden. Man bezeichnet eine solche Anordnung der Drähte



Fig. 263. Schleifenwickelung mit Parallelschaltung.

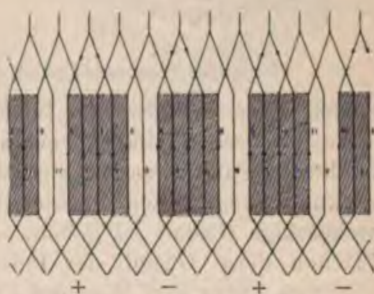


Fig. 264.

auf dem Anker daher als Schleifenwickelung. Die zu einer Schleife gehörigen Teile befinden sich an Stellen, an welchen sie entgegengesetzt gerichteten Induktionswirkungen ausgesetzt sind, die sich summieren, weil der Draht entgegengesetzte Richtung erhalten hat.

In dem folgenden Beispiele (Fig. 265 und Fig. 266) ist ein Trommelanker mit Reihenschaltung dargestellt. Während bei der Parallelschaltung mehrpoliger Anker stets ebensoviele Stromzweige als Pole vorhanden sind, ergiebt die Reihenschaltung nur zwei Stromzweige und daher nur zwei Bürsten. Unter sonst gleichen Verhältnissen ist bei allen Ankerarten bei Reihenschaltung die E M K p mal so gross und die Stromstärke $\frac{1}{p}$ von der bei Parallelschaltung, wenn p die Anzahl der vorhandenen Polpaare des Feldes bedeutet.

Man wird die Reihenschaltung bei mehrpoligen Maschinen daher dann anwenden, wenn man hohe Spannung erzielen will, oder eine vorgeschriebene Spannung bei geringer Umfangsgeschwindigkeit des Ankers. Die von Fritsche gewählte Darstellungsweise hat sich hier in mehrfacher Weise fruchtbar erwiesen. Es zeigt sich nämlich



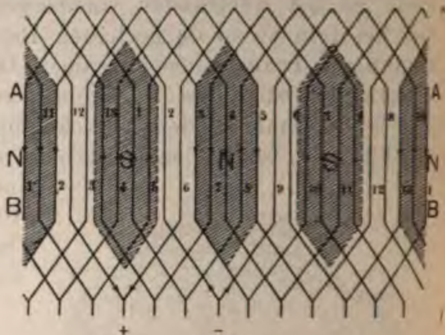


Fig. 265. Fig. 266.
Vierpoliger Trommelanker mit Reihenschaltung und Wellenwickelung.

sofort, dass die gesamte Wickelung lediglich auf der Mantelfläche des cylindrischen Ankerkernes ausgeführt werden kann, und dass es in diesem Falle zweckmässig ist, um die Länge des der Induktionswirkung ausgesetzten Drahtes zu vergrössern, den Polschulen eine sechseckige Gestalt zu geben. (Fig. 266 zeigt an den schraffierten Flächen diese Gestalt der Pole.) Verfolgt man in dieser und der nächsten Figur den Weg des Stromes die Pfeile entlang, so erkennt man sofort, dass hier vom Drahte keine Schleifen auf der Ankeroberfläche gebildet werden, sondern dass der Draht vielmehr wellenförmig auf dem Cylinderumfange auf und nieder steigt. Man bezeichnet eine solche Anordnung als Wellenwickelung.

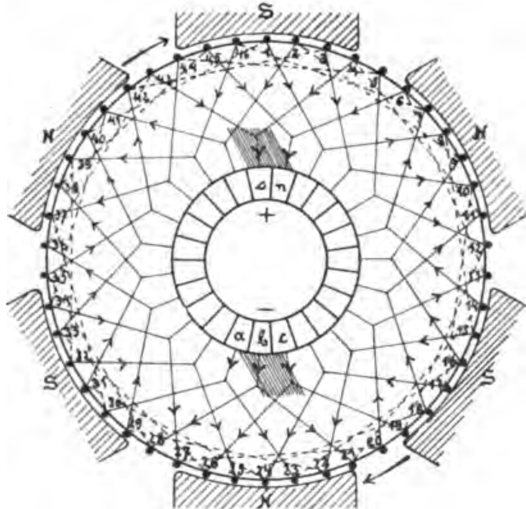
Weiterhin wurde Fritsche darauf aufmerksam, dass man das mittlere Rechteck A B B_1 A_1 der Figur ganz herausschneiden und die übrig bleibenden Stücke nach der Mitte zusammenschieben könne. Die Polschuhe erhalten dann rhombische Gestalt. Die Wickelung wird dadurch ausserordentlich vereinfacht. (Vergl. Fig. 267.)



Fig. 267. Stabwellenwickelung bei Gebrauch rhombischer Polschuhe nach Fritsche.

Bei vielpoligen Ankern mit Schleifenwicklung entstehen manchmal, wenn der Kraftlinienstrom in den verschiedenen Polen ungleich ist, schädliche innere Ströme, weil die einzelnen Teile der Wickelung ungleich stark induziert werden. Auch kommt es vor,

dass man zu kleine Stabzahlen oder zu kleine Anzahl von Kollektorsegmenten, oder unpassende Stromstärken erhält, wenn man reine Reihenschaltung wählt, oder Schwierigkeiten nach der entgegengesetzten Richtung, wenn man Parallelschaltung anwenden will. Für alle diese Fälle gewährt die von E. Arnold erfundene Reihenparallelschaltung stets einen geeigneten Ausweg. Dann ist die Anzahl der Ankerstromkreise unabhängig von der Polzahl; die zu einem Ankerstromkreis gehörenden Leiter sind auf sämtliche Pole verteilt. Die Wickelung kann als einfache oder mehrfach geschlossene ausgeführt werden. Man kann zwei oder mehr Bürsten verwenden, die Dauer des Kurzschlusses der Spulen kann durch Verstellung einer der Bürsten des Paares geändert werden.



Reihen-Parallelschaltung nach Prof. E. Arnold.

Fig. 268.

Es stellt z. B. Fig. 268 eine solche Reihenparallelschaltung des Trommelankers einer sechspoligen Maschine dar. Im Anker sind 4 Stromkreise vorhanden, die Wickelung ist einfach geschlossen. Die einen Stromweg bildenden Stäbe 30, 37, 44, 5, 12, 19 sind bei der in der Zeichnung dargestellten Lage durch die Kollektorsegmente a. u. c, auf welchen die negative Bürste aufliegt, kurzgeschlossen.

12. Die Scheibenanker.

Bei dem Ringanker und dem Trommelanker drehen sich die der Induktionswirkung ausgesetzten Drähte um eine zur Richtung der Kraftlinien senkrechte Achse; bei dem Scheibenanker erfolgt die Drehung dagegen um eine Achse, die der Kraftlinienrichtung parallel ist.

Bei den erstgenannten beiden Konstruktionen legen die Kraftlinien einen ziemlich beträchtlichen Teil ihres Weges im Anker selbst zurück, und der Kern des Ankers wird deshalb, um den magnetischen Widerstand zu verkleinern, aus Eisen hergestellt. Die Anwendung des Eisens im Anker hat aber mancherlei Nachteile im Gefolge, die

zumal bei Maschinen mit einer grossen Zahl von Polen sehr merklich werden. Das häufige Ummagnetisieren des Ankereisens erzeugt Arbeitsverluste durch Hysteresis und Wirbelströme im Eisen; die dadurch herbeigeführte beträchtliche Erwärmung des Eisens gestattet nicht, auch eine stärkere Erwärmung der induzierten Drähte durch Stromwärme zuzulassen; man muss sich daher mit geringer Stromdichte in den Ankerdrähten begnügen.

Die in den Ankerdrähten induzierten Ströme verursachen endlich die vorher im 4. Absatz dieses Kapitels (S. 366) erwähnte Quermagnetisierung des Ankereisens, welche nicht nur den grössten Teil der Bürstenverschiebung bedingt, sondern auch schwächend auf das Magnetfeld zurückwirkt.

Bei den Scheibenmaschinen giebt man dem Anker eine geringe Dicke; derselbe rotiert zwischen Magnetfeldern von abwechselnd entgegengesetzter Richtung, die dadurch gebildet werden, dass man auf der Peripherie zweier Kreise in geringem Abstande entgegengesetzte Pole einander gegenüberstellt. In den nachfolgenden Figuren 269 bis 273 liegt immer eine Gruppe abwechselnder Pole hinter der Papierebene, und jedem dieser Pole steht diesseits des Scheibenankers, also oberhalb der Papierebene, ein entgegengesetzter Pol gegenüber.

Ein eiserner Ankerkern kann meist ganz wegfallen, weil die Kraftlinien nur einen kurzen Weg von Pol zu Pol zurückzulegen haben.

Die Scheibenanker eignen sich ganz besonders für vielpolige Maschinen. Man kann leicht eine vorzügliche Ventilation erreichen und auch aus diesem Grunde die Stromdichte in den der Induktionswirkung ausgesetzten Leitern bedeutend vergrössern. Alle die von dem Gebrauche des Eisens im Inneren des Ankers herrührenden Nachteile können in Wegfall gebracht werden. Eine schwer zu überwindende Schwierigkeit bei dieser Konstruktion bleibt es jedoch, dem Anker die nötige Festigkeit zu verleihen, sodass er bei höheren Umdrehungsgeschwindigkeiten die nötige Sicherheit gegen die Wirkungen der Centrifugalkraft behält. Auch die Verbindung der Drahtstücke untereinander und mit dem Kollektor ist meist nicht leicht herzustellen. Infolgedessen haben bis auf die neuere Zeit Maschinen mit Scheibenankern keinen sonderlichen Eingang in der Praxis gefunden. Wir begnügen uns damit, nur drei der wichtigsten Formen für Gleichstrom hier zu beschreiben. Bei Beschreibung von Wechselstrommaschinen bietet sich Gelegenheit, noch mehrere andere in die Klasse der Scheibenanker gehörige Konstruktionen ausführlicher zu behandeln.

Fig. 269 stellt eine von Edison herrührende Anordnung für eine vierpolige Maschine dar. Die unter der Papierebene gelegenen

Pole sind durch die Schraffierung kenntlich gemacht; die über der Papierebene befindlichen entgegengesetzten Pole sind weggelassen. Man muss sich also vorstellen, dass oberhalb der Papierebene noch ein zweiter Kranz von Elektromagneten gelegen ist, derart, dass jedem unter der Papierebene gelegenen Südpol ein Nordpol, jedem Nordpol ein Südpol gegenübersteht. In dem kleinen Zwischenraume, der zwischen diesen ungleichnamigen Polen bleibt, bewegt sich der Scheibenanker.

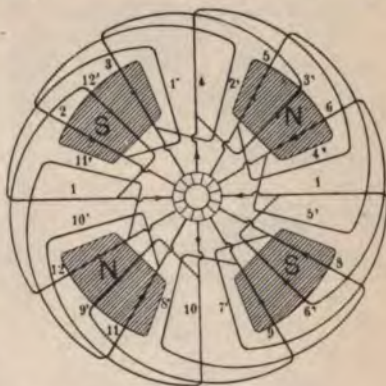


Fig. 269. Vierpoliger Scheibenanker von Edison.

Wenn man den Weg der induzierten Ströme in den Drähten verfolgt, erkennt man sofort, dass man es mit einer Schleifenwickelung zu thun hat. Man bemerkt aber auch weiter, dass die am Umfange gelegenen, den Induktionswirkungen nicht ausgesetzten, nach einem Kreisbogen gekrümmten Drahtstücke verhältnismässig lang sind. Diese Stücke fallen aber um so kürzer aus, je grösser die Zahl der Pole wird.

Bei dieser Anordnung zerfällt die Ankerwickelung in vier parallel geschaltete gleiche Teile, sodass vier Bürsten erforderlich sind.

Besondere Aufmerksamkeit hat der für Reihenschaltung bestimmte Scheibenanker mit Wellenwickelung von Desrozier (1889) erregt. Derselbe ist in mehrfacher Beziehung eigenartig. Die Wickelung zerfällt in zwei symmetrische Hälften, von denen jede für sich ausgeführt und dann erst mit der andern verbunden wird. Die Zahl der Kollektorsegmente ist derart vermehrt, dass durch jede Bürste gleichzeitig nur eine Windung kurzge-


Fig. 270. Leiterelement eines Desrozier'schen Scheibenankers.

schlossen wird. Setzt man voraus, dass 6 Polpaare und 64 Ankerstäbe, in jeder Hälfte 32, an der Maschine vorhanden sind, so besteht jede Spule aus zwei radialen Teilen, die vorn, dann zwei Stäben, die in dem hinteren Teile des Ankers, und wieder zwei Stäben, die vorn gelegen sind; dieselben sind verknüpft durch (vergl. Fig. 270) nach Kreisevolventen gekrümmte Verbindungsstücke. Ein vollständiges Wickelungselement enthält dreimal zwei radiale Teile und zwei Verbindungsstücke z. B. a b c d h b′ c′ d′ h′ b c d in Fig. 270. Die nächste Fig. 271 zeigt die beiden Hälften des fertiggewickelten Ankers in schematischer Darstellung. Von jeder Verbindungsstelle zweier Elemente führen Abzweigungen zu je 3 Kollektorsegmenten, die einen Winkel von 120° mit einander einschliessen. In Fig. 271 sind nach E. Arnold die Verbindungen der beiden Ankerhälften, jede besonders, gezeichnet. Die beiden Hälften werden dann aufeinander gelegt, sodass 1 auf 1′, 2 auf 2′ u. s. f.



Fig. 271 A, linke Seite



Fig. 271 B, rechte Seite eines Desrozier'schen Scheibenankers.

zu liegen kommt. Die scheinbar freien Enden von 1 und 1′, 2 und 2′ u. s. f. werden alsdann miteinander verbunden. Die positive

Bürste liegt bei dem Kollektorsegment 29, 30, die negative bei 24, 25 an. Es entsteht eine einfach geschlossene Wickelung mit Reihenschaltung.

Um dem Anker die nötige Steifheit zu geben, sind die Drähte auf einer dünnen Neusilberplatte befestigt, die mit Pressspan überzogen und durch eine Nabe auf der Welle befestigt ist. In dieser Scheibe müssen Wirbelströme induziert werden, die zu Arbeitsverlusten und Erwärmungen Anlass geben.

Einen bedeutenden Fortschritt in der Herstellung von Scheibenankern hat Fritsche erzielt. Er stellt, um den Kraftlinien weniger Widerstand darzubieten, den Anker aus geraden eisernen Stäben her, die in zwei parallelen Ebenen untergebracht sind, und durch Stäbe, die der Drehachse parallel sind, miteinander verbunden werden. Diese am äusseren Umfange liegenden Verbindungsstücke dienen gleichzeitig als Kollektor. Die Stellen, an welchen die Bürsten anliegen, sind in der Fig. 272 durch + und — angedeutet.

Mit der Drehachse ist das ganze Stabsystem durch eine Nabe mit isolierenden Zwischenstücken verbunden.

Die Schaltung der Stäbe und die Lage der hinter der Papierebene gelegenen Pole ist aus der Abbildung leicht zu ersehen. Die auf der Vorderfläche gelegenen Stäbe sind ausgezogen, die auf der Hinterfläche gelegenen gestrichelt angegeben.

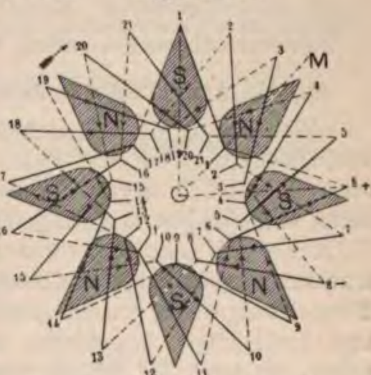


Fig. 272. Radanker von Fritsche.

Verfolgt man den Stromlauf an irgend einer Stelle, so sieht man ein, dass man es mit einem schönen Beispiele der Wellenwickelung zu thun hat.

Die Konstruktion gestattet eine vorzügliche Lüftung des Ankers. Da die Kraftlinien teilweise ihren Weg durch die Eisenstäbe nehmen, die an Stelle des Kupfers zur Herstellung der Wickelung dienen, kann man den Anker etwas breiter und widerstandsfähiger herstellen, als dies sonst bei Scheibenankern möglich ist.

Fritsche hat der von ihm erdachten eigenartigen Anordnung den Namen Radanker gegeben.

Da die ursprüngliche Einrichtung der Radanker sich deshalb nicht recht bewährte, weil die gebogenen Eisenstäbe ihre Gestalt änderten, wenn die Maschine sich erwärmte, so hat bei neueren Maschinen Fritsche die radialen Eisenstäbe in eine Ebene verlegt und durch nach Evolventen gekrümmten, an den äusseren und inneren Umfang verlegte Kupferbänder untereinander verbunden.

Dadurch ist z. B. die in Fig. 273 für eine vierpolige Maschine schematisch angegebene Form des Ankers entstanden. In dem skizzierten Beispiel sind 34 Stäbe vorhanden, der erste Stab ist innen mit dem achten, dieser aussen mit dem fünfzehnten verbunden u. s. f. Es ist also auch bei dieser Ankerform reine Wellenwickelung beibehalten. Die ungeradzahligen Stäbe sind jedesmal mit einem Segmente des am äusseren Umfange befindlichen Kollektors verbunden. Um eine gute Isolation zu ermöglichen, werden die kupfernen Verbindungsstücke abwechselnd rechts und links neben den radialen Eisenstäben vorüber geführt.



Fig. 273.
Fritsches neuer Radanker mit in einer Ebene liegenden radialen Stäben.

18. Die Arnold'sche Schaltungsregel für Ankerwickelungen.

Wenn man die zahlreichen Vorschläge für die Bewickelung der verschiedenen Arten von Ankern betrachtet, so scheint es fast, als ob es unmöglich wäre, alle diese verschiedenen Anordnungen unter einen einheitlichen Gesichtspunkt zusammenzufassen. Es ist jedoch E. Arnold[1]) gelungen, diese Aufgabe durch eine geometrische Betrachtung in überraschend einfacher Weise zu lösen.[2]) Er hat eine Formel aufgestellt, welche gestattet, für alle Ankerwickelungen zwei- und mehrpoliger Maschinen, sowohl für Ringanker und Trommelanker, als auch für Scheibenanker, anzugeben, in welcher Weise die Ankerspulen oder Ankerstäbe miteinander zu verbinden sind.

Es bezeichnet p die halbe Polzahl, S die Anzahl der am Umfange eines Ankers liegenden Wickelungsfelder oder Spulen, y den Wickelungsschritt, d. i. die Anzahl von Wickelungsfeldern, um welche man in der Schaltungsrichtung fortschreiten muss, um die Spule zu finden, deren Anfang mit dem Ende jener Spule verbunden werden soll, a die halbe Zahl der Ankerstromzweige, c die Zahl der induzierten Stäbe eines Wickelungselementes. m ist die Anzahl der Polpaare, die der Wickelungsschritt umfasst. Liegt die nächste Spule unter

[1]) Man vergleiche das treffliche Werk von E. Arnold: Die Ankerwickelungen und Ankerkonstruktionen der Gleichstrom-Dynamomaschinen (Dritte Aufl. 1899, Berlin, Springer; München, R. Oldenbourg), dem wir auch mehrere Figuren dieses Kapitels entnommen haben.

[2]) Bezüglich der Ableitung dieser Schaltungsregeln verweisen wir auf die Abhandlung von Reithofer, Eichberg und Kalir, Zeitschrift für Elektrotechnik, Heft 2, 1898, S. 17 u. s. f.

demselben Pole, so ist $m = 0$; erfolgt die Verbindung mit einer Spule des nächstfolgenden gleichnamigen Poles, so ist $m = 1$; schliesst man jedoch an die erste Spule eine solche des zweitfolgenden Poles gleicher Polarität, so ist $m = 2$ u. s. f. Bezüglich S und c gilt die Regel, dass neben- oder übereinander gewickelte Drähte derselben Spule einfach zu rechnen sind. Dann ist allgemein:

$$y = \frac{m \cdot S \pm a}{p} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

Man gelangt zu dieser Formel z. B. auch durch folgende einfache Betrachtung: Da alle Spulen gleich gewickelt werden, dürfen nur Spulen hintereinander geschaltet werden, die unter gleichnamigen Polen liegen. In Leiterelementen ausgedrückt, ist der Abstand zweier gleichnamiger Pole gleich $\frac{S}{p}$.

Der Abstand, um den zwei aufeinander folgende Spulen gegenüber den Polmitten verschoben werden, ist:

$$+ m \cdot \frac{S}{p} \mp y, \text{ je nachdem } y \lessgtr m \cdot \frac{S}{p}$$

ist.

Nachdem der Wickelungsschritt $\frac{S}{2}$ mal ausgeführt worden ist, muss bei reiner Hintereinanderschaltung die $\frac{S}{2} + 1$te Spule unter einem entgegengesetzten Pole liegen, d. h. um $\frac{S}{2p}$ verschoben sein.

Dies ergiebt die Gleichung:

$$\frac{S}{2} \cdot \left(\pm m \cdot \frac{S}{p} \mp y\right) = \frac{S}{2p} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

oder, wenn wir annehmen, dass 2a parallele Ankerstromkreise vorhanden sind:

$$\frac{S}{2a} \cdot \left(\pm m \cdot \frac{S}{p} \mp y\right) = \frac{S}{2p} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

Hieraus folgt, wie oben:

$$y = \frac{m \cdot S \pm a}{p}.$$

Da y eine ganze Zahl sein muss, ist es nötig, bei der Wahl der Ankerzahl S des Wickelungselements dies zu berücksichtigen.

Ist x die Nummer einer beliebigen Spule, so wird das Ende der xten Spule mit dem Anfange der $(x + y)$ten Spule verbunden. (I. Schaltungsregel nach Arnold.)

Die Spulenanfänge werden der Reihe nach mit 1, 2, 3 . . . ., die Spulenenden mit 1′, 2′, 3′ . . . . bezeichnet.

Für die Spiral- und Schleifenwickelungen ist $m = 0$, für Wellenwickelungen kann m eine beliebige ganze Zahl sein. Bei den praktisch wichtigen Wellenwickelungen ist $m = 1$.

In vielen Fällen ist es wünschenswert, unmittelbar für die auf der Ankeroberfläche gleichmässig verteilten einzelnen Stäbe oder Drähte die zu wählenden Verbindungen zu erhalten. Alsdann numeriert man diese sämtlichen Stäbe von 1 bis s. Gehören nun zu einem einzelnen Wickelungselement c einzelne der Induktionswirkung ausgesetzte Stäbe, so ist sichtlich die Zahl S dieser Wickelungselemente:

$$S = \frac{s}{c} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

Man schreitet dann jedesmal um $y\,c$ Stäbe für jedes Wickelungselement vorwärts, und jeder solche Wickelungsschritt setzt sich aus c einzelnen Stäben und ebensoviel einzelnen Schritten zusammen. Es ist somit: $c\,y = y_1 \pm y_2 \pm y_3 \pm \ldots \pm y_c$.

In der Praxis ist selten c grösser als zwei, daher:

$$2\,y = y_1 \pm y_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 5)$$

Das negative Vorzeichen gilt, wenn der zweite Teilschritt nach rückwärts erfolgt.

Durch Einsetzung in Gleichung 1 ergiebt sich:

$$y_1 \pm y_2 = \frac{m \cdot s \pm c \cdot a}{p} \quad \ldots \ldots \quad 6)$$

Für Spiralwickelung ist $m = 0$ und $c = 1$, folglich:

$$y = \pm \frac{a}{p} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 7)$$

Bei Schleifenwickelung erfolgt der zweite Teilschritt zurück, es ist $m = 0$ und $c = 2$, daher:

$$y_1 - y_2 = \pm \frac{2\,a}{p} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

Die Grösse der Teilschritte y_1 und y_2 ist durch die Formel nicht bestimmt; aber es ist ersichtlich, dass die Teilschritte y_1 und y_2 derart bemessen sein müssen, dass sich die in den Drähten induzierten EMKräfte in allen Stellungen des Ankers zu den Polen summieren, die Grössen y_1 und y_2 müssen daher nahezu gleich der Poldistanz, d. h. $= \frac{s}{2\,p}$ sein.

Ist $\frac{s}{2\,p}$ nicht von selbst eine ganze Zahl, so muss zu s eine solche Zahl b addiert oder subtrahiert werden, dass $\frac{s \pm b}{2\,p}$ eine ganze Zahl wird.

Daher gelten für Schleifenwickelung die Ausdrücke:

$$y_1 = \frac{s+b}{2p} + \frac{a}{p} \qquad y_2 = \frac{s+b}{2p} - \frac{a}{p} \quad . \; . \; . \quad 9)$$

Bei Wellenwickelungen an Ringankern ist $m = 1$, $c = 1$, folglich:

$$y = \frac{s \pm a}{p}.$$

Bei Wellenwickelungen an Trommelankern ist $m = 1$, $c = 2$ und danach:

$$y_1 \pm y_2 = \frac{s + 2a}{p}.$$

Dann heisst die Schaltungsregel (II nach Arnold):

Man verbinde das vordere Ende des $x$ten Stabes mit dem vorderen Ende des $(x + y_1)$ten Stabes, dann das hintere Ende des $(x + y_1)$ten Stabes mit dem hinteren Ende des $(x + y_1 + y_2)$ten Stabes u. s. f.

y_1 und y_2 müssen relativ prim, und ihre Summe oder Differenz muss durch 2 teilbar sein.

Hat man es mit einem Nutenanker zu thun, der z Nuten hat, und liegen in jeder Nute r Stäbe, so ist selbstverständlich die Gesamtzahl s der Stäbe: $s = z \cdot r$,

und man hat diesen Ausdruck in die vorstehenden Gleichungen einzusetzen. Gelangt man von irgend einem Punkte einer Wickelung ausgehend, entlang der Wickelung fortschreitend, erst zum Ausgangspunkte zurück, nachdem sämtliche Spulen oder Stäbe getroffen worden sind, so hat man eine einfach geschlossene Wickelung vor sich. Eine einfach geschlossene Wickelung setzt voraus, dass y und S relativ prim zu einander sind, d. h. keinen gemeinschaftlichen Teiler haben.

Es können jedoch auch mehrere in sich geschlossene Wickelungen auf einem Anker vorkommen. Solche Fälle sind aber selten und können meist mit Änderung der Spulenzahl, unter Beibehaltung der Anzahl der Ankerstromkreise, auf eine geschlossene Wickelung zurückgeführt werden.

Selbstverständlich ist die Bedingung, dass bei der Anordnung einer Wickelung kein Wickelungselement oder Stab zweimal getroffen werden darf.

14. Einteilung der Schaltungen der Ankerwickelungen nach E. Arnold.

Die verschiedenen Ankerschaltungen für Ring-, Trommel- und Scheibenanker gruppieren sich danach in drei Hauptklassen:

1. Reihenschaltung. Für diese ist stets $a = 1$ und $m = 1$. Im besonderen Falle $p = 1$ (bei zweipoligen Maschinen) sind Parallel-

und Reihenschaltung identisch, und die Wickelung kann sowohl eine Schleifenwickelung als eine Wellenwickelung sein. Für $p > 1$ (für mehr als zweipolige Maschinen) ergiebt sich stets eine Wellenwickelung.

Es ist stets:

$$y = \frac{S \pm 1}{p} \quad \dots\dots\dots\dots \quad 10)$$

und bei Trommel- und Scheibenwickelungen

$$c = 2,$$

folglich:

$$y_1 + y_2 = \frac{2S \pm 2}{p} \quad \dots\dots\dots \quad 11)$$

y_1 und y_2 müssen ungerade ganze Zahlen und $\frac{y_1 + y_2}{2}$ und $2S$ relativ prim sein.

2. Einfache Parallelschaltung. Der Ankerumfang kann unter Benutzung der Fritsche'schen Darstellung bei mehrpoligen Maschinen durch einfache Zusammensetzung der Schemata mehrerer zweipoliger Anker gleicher Art erhalten werden.

Dann ist $m = 0$, $a = p$ die Zahl der Ankerstromkreise gleich der Polzahl, und somit: $y = \pm 1$ . . . . 12)

Bei Spiralwickelung ist ausserdem noch

$$c = 1, \; S = s.$$

Bei Schleifenwickelung ist $c = 2$, $S = \frac{s}{2}$, folglich

$$, \; y_1 - y_2 = \pm 2, \; y_1 = \frac{s \pm b}{2p} + 1, \; y_2 = \frac{s \pm b}{2p} - 1 \quad . \quad 13)$$

α) Bei Parallelschaltung mit Schleifenwickelung setzen wir $c = 2$, $S = \frac{s}{2}$.

Ferner ergiebt sich:

$$y = \pm 2n \text{ und } y_1 = \frac{s \pm b}{2p} + n, \; y_2 = \frac{s \pm b}{2p} - n \quad . \quad 14)$$

n muss eine ganze Zahl und grösser als 1 sein.

β) Parallelschaltung mit Wellenwickelung. Man setzt einfach $a = p$. Will man eine einzige in sich geschlossene Wickelung herstellen, so dürfen y und $\frac{z}{b}$ keine gemeinschaftlichen Teiler ausser 1 enthalten.

3. Mehrfache Parallelschaltung mit mehr Ankerstromkreisen als Polen. Man setzt $m = 0$, $a = np$.

α) Mehrfache Parallelschaltung mit Spiralwickelung.

Dann ist ausserdem noch $c = 1$, $S = s$, folglich $y = \pm n$.

β) Mehrfache Parallelschaltung mit Schleifenwickelung.

In diesem Falle ist:

$$c = 2,\ S = \frac{s}{2},\ y = y_1 - y_2 = + 2n \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

$$y_1 = \frac{s + b}{2p} + n,\ y_2 = \frac{s + b}{2p} - n \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

Man erhält einfach geschlossene Wickelungen, wenn y_1 und y_2 ungerade, $\frac{y_1 + y_2}{2}$ und $\frac{s}{2}$ relativ prim sind.

4. Gemischte Schaltungen.[1]) Bei diesen ist $m = 1$ und $a > 1$ und $a \gtrless p$. In diesem Falle ergeben sich entweder mehrere in sich geschlossene Wickelungen mit besonderen Stromabnahmestellen, oder es entsteht eine einzige in sich geschlossene Wickelung mit a Stromverzweigungen.

α) Bei Reihenparallelschaltung mit Ringwickelung ist $c = 1$, $S = s$,

$$y = \frac{S + a}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 17)$$

β) Bei Reihenparallelschaltung für Trommel- und Scheibenwickelung ist $c = 2$, $S = \frac{s}{2}$,

$$y = \frac{S + a}{p},\ y_1 + y_2 = \frac{s + 2a}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 18)$$

Will man eine einfach geschlossene Wickelung erhalten, müssen y_1 und y_2 ungerade, und $\frac{y_1 + y_2}{2}$ und $\frac{s}{2}$ müssen relativ prim sein.

Diese von Arnold erfundenen und eingeführten Reihenparallelschaltungen bieten den grossen praktischen Vorteil dar, dass jeder Strom den Wirkungsbereich sämtlicher Magnetfelder durchläuft, Ungleichheiten in der Magnetisierung, wie solche z. B. beim Anlaufen der Maschine vorkommen, Ungleichheiten der Bohrung, des Gusses u. s. w. nicht innere Ströme im Anker veranlassen können. Die Zahl der Ankerstromkreise ist bei dieser Wickelung unabhängig von der Polzahl. Die Zahl der Bürsten kann beliebig bis auf zwei vermindert werden.

15. Beispiele für die Anwendung der Schaltungsregeln.

Einige Beispiele werden die vielseitige Verwendbarkeit und allgemeine Giltigkeit der Arnold'schen Schaltungsregel zeigen.

[1]) Auf diese mehrfach für die Praxis wichtige Schaltungsarten hat zuerst E. Arnold aufmerksam gemacht, und diese, sowie die einfach geschlossenen, mehrfachen Parallelschaltungen zuerst angewendet.

Bei der einfachen Wickelung eines **Grammeringes**, die wir auf S. 362 (Fig. 245) abgebildet haben, ist z. B. $S = 12$ (weil wir die mehrfachen Windungen derselben Spule einfach zählen), $p = 1$ (die Maschine ist zweipolig), $a = 1$ (weil Reihenschaltung vorliegt), $m = 0$.

Wir haben somit
$$y = + \frac{1}{1} = + 1,$$
d. h. das Ende der 1. Spule ist mit $1 + 1 = 2$, d. h. mit dem Anfange der 2. Spule zu verbinden; allgemein muss die $x$te Spule mit der $x + 1$ten, das ist mit der nächsten Spule, verbunden werden.

Bei dem in Fig. 260 dargestellten Trommelanker einer zweipoligen Maschine nach **Edison** ist die Zahl der Wickelungsräume $S = 9$, $s = 18$, $p = 1$, $a = 1$. Da hier von jeder Spule zwei Stäbe der Induktionswirkung unterworfen sind, muss $m = 1$, $c = 2$ gesetzt werden, und man erhält aus Gleichung 9):
$$y_1 = \frac{s + b}{2p} + 1 = \frac{18 - 2}{2} + 1 = 9$$
$$y_2 = \frac{s + b}{2p} - 1 = \frac{18 - 2}{2} - 1 = 7.$$

Der Anfang der $x$ten Spule ist demnach mit dem Ende der $(x + 9)$ten Spule, das Ende der $x + 9$ten Spule mit dem Anfang der $x + 9 - 7 = x + 2$ten Spule zu verbinden.

Wir betrachten den vierpoligen Trommelanker (Fig. 263) als Verdoppelung der zweipoligen Maschine.

Wir setzen $a = 2$, $p = 2$, $s = 24$, $S = 12$ und erhalten:
$$y_1 = \frac{24 - 8}{4} + 1 = 5 \qquad y_2 = \frac{24 - 8}{4} - 1 = 3.$$

Für b ist somit nicht der kleinstmögliche Wert, sondern 8 gewählt. Man erhält dann einen Anker mit verkürztem Wickelungsschritt.

Das Ende der $x$ten Spule ist mit dem Anfange der $x + 5$ten Spule und dieser mit dem Anfang der $x + 5 - 3 = x + 2$ten Spule zu verbinden, und das giebt genau die gezeichnete Schaltung.

Der Ringanker mit Reihenschaltung (also $a = 1$) Fig. 255 fügt sich auch der Schaltungsregel in einfacher Weise. Es ist $s = 9$, $p = 2$, $m = 1$. Dies giebt:
$$y = \frac{s + 1}{p} = \frac{9 + 1}{2} = \begin{cases} 5 \\ 4 \end{cases}$$

Das Ende 1' der 1. Spule ist mit $1 + 5 = 6$, d. h. dem Anfange der 6. Spule, verbunden u. s. f.

Für den Trommelanker einer vierpoligen Maschine mit Reihenschaltung (vergl. Fig. 265) ist $s = 26$, $S = 13$, $m = 1$, $a = 1$, $c = 2$, $p = 2$. Man findet

$$y = \frac{S + 1}{p} = \frac{13 + 1}{2} = \begin{cases} 7 \\ 6 \end{cases}$$

In der Figur ist $y = 6$ gewählt.

Ferner betrachten wir den Scheibenanker nach Desrozier.

Es ist in dem von uns dargestellten Beispiele $p = 3$, $a = 1$, $m = 1$, $c = 2$, $s = 64$, $S = 32$, somit:

$$y = \frac{S + 1}{p} = \frac{32 + 1}{3} = 11 \qquad y_1 = 6,\ y_2 = 5,$$

was ganz den in Fig. 270 gezeichneten Verbindungen entspricht.

Bei dem achtpoligen Scheibenanker von Fritsche (Fig. 272) ist:

$$p = 4,\ s = 42,\ y = \frac{s + 2}{p} = \frac{42 + 2}{4} = 10,\ y_1 = y_2 = 5.$$

Man hat also Stab 1 mit Stab $1 + 5 = 6$ zu verbinden. Man denkt sich aussen und innen den Anker durch zwei Kreise begrenzt, halbiert den Winkel 1, 0, 6, so findet man den Punkt a, den man mit 1 und 6 verbindet, um die Lage der Stäbe und damit die Form der Polschuhe zu finden.

Bei dem unmittelbar folgenden, in Fig. 273 abgebildeten neuen Radanker mit Wellenwickelung ist:

$$s = 34,\ p = 2,\ y_1 + y_2 = \frac{34 - 2}{2} = 16,\ y_1 = 7,\ y_2 = 9$$

gewählt.



XX. Kapitel.

Die Theorie der Gleichstrommaschinen.

1. Näherungsweise Berechnung der EMK der Gleichstrommaschinen.

Nach den in Kap. VIII, Abschn. 2, S. 164 mitgeteilten Regeln ist es leicht, die Grösse der EMK einer Gleichstrommaschine annähernd zu bestimmen.

Wir betrachten zunächst eine zweipolige Maschine mit Ringanker. Die Zahl der aus den Polschuhen aus- und durch den Luftzwischenraum in den Eisenkern eintretenden Kraftlinien sei Φ (vergl. Kap. VI, Abschn. 6, S. 133). Diese Kraftlinien teilen sich in den beiden Ringhälften in zwei gleiche Teile, und jedes dieser beiden Kraftlinienbündel, deren jedes $\frac{\Phi}{2}$ Kraftlinien enthält, wird von jeder Windung des Ankers bei einer vollen Umdrehung zweimal durchschnitten. Erfolgen u Umdrehungen in einer Minute, $\frac{u}{60}$ Umdrehungen in einer Sekunde, so werden in einer Sekunde $4 \cdot \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{u}{60}$ Kraftlinien geschnitten. Da nun aber, sofern der Ringanker im ganzen mit m Windungen bewickelt ist, in jeder Ringhälfte $\frac{m}{2}$ Windungen hintereinander geschaltet sind, so ist die induzierte EMK

$$E = 4 \cdot \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{u}{60} \cdot \frac{m}{2} = \frac{\Phi \cdot u \cdot m}{60},$$

oder, wenn man die EMK statt in Centimeter-Gramm-Sekunden-Einheiten in Volt ausdrückt:

$$E = \frac{\Phi \cdot u \cdot m}{60 \cdot 10^8}.$$

Auf genau dasselbe Ergebnis kommt man, wenn man statt eines Ringankers einen Trommelanker betrachtet; nur darf man dann unter m nicht die Zahl der Windungen verstehen, sondern muss die Zahl der auf dem Umfange des Ankers gelegenen Drähte mit m bezeichnen.

Bei dem Ringanker sind nämlich die auf der Innenfläche des Ringes gelegenen Teile der Wickelung einer nützlichen Induktionswickelung nicht ausgesetzt; beim Trommelanker sind dagegen zwei zu einer Windung gehörige Leiterteile auf der Oberfläche der Trommel gelegen und empfangen gleichzeitig sich unterstützende Induktionswirkungen; nur die auf Stirn- und Rückfläche der Trommel gelegenen Leiterteile nehmen an der Induktion nicht teil.

Die Richtung des Stromes kann leicht nach den früher (Kap. VIII, Abschn. 2, S. 167) aufgestellten Regeln bestimmt werden: »Denkt man sich derart im magnetischen Felde stehend, dass die vom Nordpol ausgehenden Kraftlinien zu den Füssen ein- und zum Kopfe austreten, und blickt man nach der Richtung, wohin die Bewegung der Drähte erfolgt, so ist der induzierte Strom stets nach rechts gerichtet.«

Ist die Maschine nicht nur zweipolig, sondern hat man p Polpaare und bezeichnet Φ die Anzahl der von jedem Nordpol aus in das Ankereisen eintretenden Kraftlinien, so werden p mal so viele Kraftlinien durchschnitten, als bei einer zweipoligen Maschine, und erhält man:

$$E = \frac{\Phi \cdot u \cdot m \cdot p}{60 \cdot 10^8}.$$

Sind endlich die Ankerwindungen in 2a parallele Stromkreise geschaltet, so kommt im Nenner noch der Faktor a hinzu, und der Ausdruck nimmt die Form an:

$$E = \frac{\Phi \cdot u \cdot m \cdot p}{60 \cdot 10^8 \cdot a} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

Man erkennt aus diesem Ausdrucke, dass die EMK einer Dynamomaschine der Anzahl der Kraftlinien Φ, der Umdrehungsgeschwindigkeit u, der Zahl der Pole p und der Anzahl m der Ankerwindungen proportional ist.

Da die verschiedenen Verluste, z. B. die Rückwirkung des Ankerfeldes, ferner die Verluste durch Hysteresis, durch Foucaultströme und durch Kurzschluss einzelner Ankerspulen durch die Bürsten, noch nicht mit in Rechnung gezogen sind, kann die Formel 1) nur als eine erste, rohe Annäherung angesehen werden.

2. Anwendung auf Elektromotoren.

Wenn man einer Dynamomaschine Strom von aussen zuführt, so werden die vom Strome durchflossenen Ankerdrähte das Bestreben erhalten, sich in dem magnetischen Felde, welches die Pole erzeugen, zu bewegen. Die Dynamomaschine arbeitet dann als Elektromotor und setzt zugeführte elektrische Energie in mechanische Arbeit um. Die Bewegungsrichtung ist derjenigen entgegengesetzt, welche dem

Anker als Stromerzeuger erteilt werden müsste, um einen Strom von gleicher Richtung zu erhalten.

Die Bewegungsrichtung findet man dann nach folgender Regel: Man denkt sich derart im magnetischen Felde stehend, dass die vom Nordpol ausgehenden Kraftlinien zu den Füssen ein- und zum Kopfe austreten. Wendet man sich nun nach der Richtung, in der der Strom die Ankerdrähte durchfliesst, so giebt der ausgestreckte rechte Arm die Richtung an, in der sich die Ankerdrähte bewegen.

Aus der Formel 1) erhält man, wenn man auf u reduziert, den Ausdruck für die Umdrehungszahl u. Derselbe lautet:

$$u = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8 \cdot a}{\Phi \cdot m \cdot p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Denken wir uns z. B. in dem zwischen den Polen N und S gelegenen, gleichförmigen Kraftlinienfelde (Fig. 274) befinde sich ein Ankerdraht. Fliesst der Strom in dem senkrecht zur Papierebene gedachten Drahte von uns fort, so wird dieser Draht (vergl. Kap. VII, Abschn. 1, S. 156) von kreisförmigen Kraftlinien konzentrisch umgeben, die in der Bewegungsrichtung des Uhrzeigers gerichtet sind. Infolgedessen entsteht rechts vom Drahte eine Verdichtung gleichgerichteter Kraftlinien, links eine Schwächung des Feldes. Da die gleichgerichteten Kraftlinien sich abstossen und zwar um so stärker, je dichter sie sind, so entsteht eine Kraft, die den Draht von rechts nach links, in der Richtung des horizontalen Pfeiles zu verschieben sucht.

Fig. 274. Verschiebung eines stromdurchflossenen Drahtes im Magnetfelde.

Je grösser demnach der Spannungsunterschied an den Klemmen der Maschine ist, um so grösser wird die Umlaufsgeschwindigkeit des Ankers. Ausserdem erkennt man auch aus der Formel, dass u durch Vermehrung der Kraftlinienzahl Φ verkleinert, durch eine Verminderung von Φ vergrössert werden kann. Die Formel 2) weist somit auf zwei Wege hin, auf welchen man zu einer Regelung der Umdrehungszahl der Elektromotoren gelangen kann.

Die Zugkraft Z, die auf den Ankerdraht von der Länge l ausgeübt wird, wenn er von einem Strome von der Stärke i durchflossen wird, ist:

$$Z = i \cdot l \cdot \mathfrak{B} \text{ absol. Einheiten} = \frac{i \cdot l \cdot \mathfrak{B}}{9{,}81 \cdot 10^6}\, kg. \quad . \quad . \quad 3)$$

Sowie aber der Draht sich im Kraftlinienfelde mit der Geschwindigkeit v bewegt, wird in ihm (vergl. Kap. VIII, Abschn. 2, S. 166) eine elektromotorische Gegenkraft induziert, die der wirksamen entgegen gerichtet ist. Diese Gegenkraft e' hat den Betrag

$$e' = \frac{v \cdot l \cdot \mathfrak{B}}{10^8} \text{ Volt.}$$

Man erhält, wenn W der Widerstand des gesamten Stromkreises ist, somit nach dem Ohm'schen Gesetze die Gleichung:

$$i = \frac{1}{W} \cdot \left(e - \frac{v \cdot l \cdot \mathfrak{B}}{10^8}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

für die wirksame Stromstärke. Man erkennt hieraus, dass die Geschwindigkeit v nicht über alle Grenzen hinaus wachsen kann, sondern höchstens, wenn alle Reibungswiderstände fehlten, einen Betrag annehmen könnte, der den Klammerausdruck zu Null macht.

3. Hauptstrommaschinen mit Selbsterregung.[1])

Bei einer Hauptstrommaschine durchläuft der im Anker erzeugte Strom hintereinander: die Ankerwindungen, die Bewickelung der Feldmagnete und den äusseren Widerstand. Bezeichnet man die Widerstände dieser drei Teile mit w_A, w_F und W, so ist die Stärke i des erzeugten Stromes:

$$i = \frac{E}{w_A + w_F + W} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Die von der Maschine überhaupt erzeugte elektrische Energie ist, wenn E die im Anker erzeugte EMK bezeichnet, gleich $E \cdot i$. Von diesem Gesamtbetrage wird die Grösse $i^2 W$ im äusseren Stromkreise verwendet, während $i^2 \cdot (w_A + w_F)$ in den Ankerdrähten und in der Bewickelung der Feldmagnete in Wärme umgesetzt wird.

Bezeichnet man die an den Bürsten beobachtete Spannungsdifferenz, also die Bürstenspannung, mit e, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze:

$$i = \frac{e}{W + w_F}$$

und somit, wenn man aus Gleichung 5) den Wert von i einsetzt und auf e reduziert:

$$e = E \cdot \frac{W + w_F}{w_A + w_F + W} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

[1]) Erfunden von Werner von Siemens im Jahre 1867.

Zwischen den Klemmen einer Hauptstrommaschine liegt nur
äussere Widerstand W. Für die **Klemmenspannung** e gilt s
die Gleichung:

$$i = \frac{e}{W},$$

hieraus findet man auf dieselbe Weise wie vorher:

$$e = E \cdot \frac{W}{w_A + w_F + W} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad .$$

Ist bei einer gewissen Geschwindigkeit der äussere Widerstan
zu gross, so geht die Maschine nicht an; ebenso bedarf es bei
gebenem äusseren Widerstande einer gewissen Geschwindigkeit
Ankers zum Angehen der Maschine.

Wenn der äussere Widerstand W abnimmt, wächst die St
stärke in viel höherem Masse, weil einerseits der äussere Widers
sich vermindert und gleichzeitig, wegen der Verstärkung des
netischen Feldes, die EMK zunimmt.

Fig. 275 stellt z. B. die Abhängigkeit der Stromstärke (i)
der Klemmenspannung (k) von der Grösse des äusseren W
standes bei einer Hauptstrommaschine graphisch dar.[1] Die Uml
zahl ist während des Versuches unverändert geblieben.

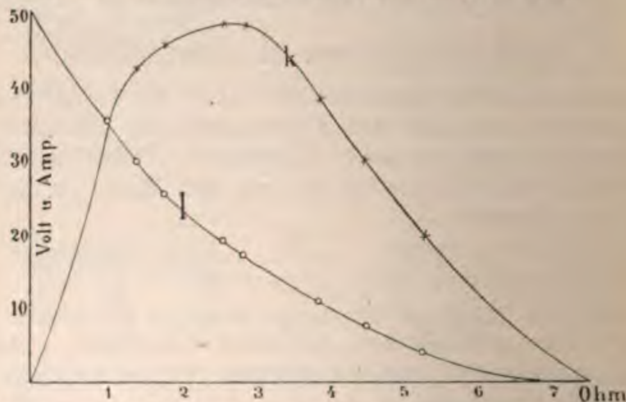


Fig. 275. Abhängigkeit der Stromstärke J und der Klemmenspannung k vom Wide
bei einer Hauptstrommaschine.

Der äussere Widerstand darf demnach nicht unter eine ge
Grenze abnehmen, wenn die Stromstärke der Hauptstrommasc
nicht auf einen Betrag wachsen soll, durch den die Maschine
gefährdet wird. Man schaltet daher stets vor die Maschine
Bleisicherung, die abschmilzt, wenn die Stromstärke einen gew
noch zulässigen Grenzwert überschreitet.

[1]) In Wirklichkeit nähert sich die J-Kurve der Ordinatenachse, die k
der Abscissenachse nur asymptotisch.

Eine Hauptstrommaschine soll nicht plötzlich ausgeschaltet werden, da die durch Selbstinduktion entstehenden Extraströme von hoher Spannung sonst leicht die isolierenden Zwischendichten der Drähte durchschlagen können. Wollte man während des vollen Ganges die Bürsten abzuheben versuchen, so würden die heftigen Funken, die zwischen Bürsten und Kollektor entstehen, den Kollektor beschädigen.

Will man eine Hauptstrommaschine ausschalten, so muss dies entweder dadurch geschehen, dass man allmählich in den äusseren Stromkreis immer grössere Widerstände einschaltet und dadurch die Stromstärke so lange vermindert, bis man den Strom unbedenklich unterbrechen kann, oder dass man parallel zu den Windungen der Feldmagnete Widerstände von abnehmender Grösse schaltet, bis dieselben schliesslich kurzgeschlossen sind, sodass die Feldstärke allmählich Null wird.

Wenn man in den Stromkreis einer Hauptstrommaschine, die eine Klemmenspannung e erreicht hat, eine Akkumulatorenbatterie einschaltet, die eine entgegengesetzt gerichtete EMK e' besitzt, so ist die Stromstärke J

$$J = \frac{e - e'}{W},$$

wenn W den Gesamtwiderstand des ganzen Stromkreises bezeichnet.

Sinkt nun e, weil etwa die Maschine langsamer zu gehen anfängt, so kann die im Zähler stehende Differenz negativ werden, d. h. der Strom kann sich umkehren. Dadurch würde der Magnetismus der Elektromagnete dauernd umgekehrt werden; die Maschine würde ummagnetisiert werden und eine Entladung der Akkumulatoren mit unzulässig hoher Stromstärke erfolgen. Hauptstrommaschinen und ebenso gemischte Maschinen (Compound-Maschinen, vergl. Kap. XIX, Abschn. 1, S. 355), welche ebenfalls eine vom Hauptstrom durchflossene Wickelung auf den Elektromagneten haben, können daher zum Laden von Akkumulatoren im allgemeinen nicht verwendet werden, oder es bedarf wenigstens alsdann ganz besonderer Vorsichtsmassregeln.

4. Nebenschlussmaschinen.[1])

Der zuletzt erwähnte Übelstand kommt in Wegfall, wenn die Bewickelung der Feldmagnete einen Nebenschluss zum äusseren Widerstande bildet (vergl. Kap. XI, Abschn. 1, S. 355). Alsdann findet keine Umkehrung des Magnetismus der Feldmagnete statt,

[1]) Erfunden von Wheatstone im Jahre 1867.

auch wenn im äusseren Stromkreise eine EMK vorhanden ist, die grösser ist als die Bürstenspannung der Maschine. Nach den früher (Kap. I, Abschn. 20, S. 19, Gleich. 15) entwickelten Sätzen ist der Gesamtwiderstand einer aus zwei parallel geschalteten Widerständen w_F und W bestehenden Stromverzweigung gleich

$$\frac{w_F \cdot W}{w_F + W}.$$

Danach ist die äussere Stromstärke i im äusseren Stromkreise:

$$i = \frac{\mathfrak{E}}{w_A + \frac{w_F \cdot W}{w_F + W}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

die Stromstärke i in der Bewickelung der Feldmagnete aber ist:

$$i = i \cdot \frac{W}{w_F + W} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 9)$$

wenn man wiederum mit w_A den Ankerwiderstand, mit w_F den Widerstand der Bewicklung der Feldmagnete, mit W den Widerstand im äusseren Stromkreise und mit E die im Anker entwickelte EMK bezeichnet.

Fig. 276. Abhängigkeit von Stromstärke (J) und Klemmenspannung (K) vom äusseren Widerstande in einer Nebenschlussmaschine.

Man richtet es nun stets so ein, dass i nur ein kleiner Bruchteil (0,5 % bis 5 %)[1] der im Anker erzeugten Gesamtstromstärke $i_A = i + i$ wird. Man stellt daher die Bewickelungen der

[1]) Man wählt gewöhnlich möglichst nahe: $w_F = \frac{W^2}{w_A}$.

Feldmagnete aus vielen Windungen dünnen Drahtes her, die einen verhältnismässig grossen Widerstand darbieten.

Der für die Erregung der Feldmagnete erforderliche Aufwand an elektrischer Energie bleibt nahezu derselbe wie bei einer Hauptstrommaschine, sofern der von dem Drahte erfüllte Wickelungsraum und die Stromdichte ungefähr dieselben sind.

Ist $\mathfrak{E}$ die EMK der Maschine und $\mathfrak{e}$ die Klemmenspannung, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze:

$$\mathfrak{E} - \mathfrak{e} = i_A \cdot w_A,$$

folglich, da $i_A = i + i$ ist:

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{e} + w_A \cdot (i + i) \quad \ldots\ldots \quad 10)$$

Meist gehen Nebenschlussmaschinen von selbst an, auch bei offenem äusseren Stromkreise. Nimmt der äussere Widerstand unter eine gewisse Grenze ab, so wird die Maschine stromlos, weil dann durch die Bewickelung der Feldmagnete so wenig Strom fliesst, dass die Magnetisierung nicht mehr aufrecht erhalten bleibt. Es ist daher auch unbedenklich, eine Nebenschlussmaschine durch Kurzschluss, d. h. einen Widerstand von verschwindender Grösse, auszuschalten.

Da die Selbstinduktion der Feldmagnete wegen der grossen Zahl von Windungen bei Nebenschlussmaschinen sehr bedeutend ist, so wird durch plötzliche und rasch vorübergehende Stromschwankungen, denen innerhalb der Bewickelung der Feldmagnete die Selbstinduktion entgegenwirkt, der magnetische Zustand nur in geringem Masse beeinflusst.

Eine plötzliche Unterbrechung des Stromkreises der Feldmagnete wird aber wegen der hohen Selbstinduktion zu Extraströmen von sehr hoher Spannung Anlass geben, durch welche das Isolationsmaterial der Drähte beschädigt werden kann. Da man dem Anker der Nebenschlussmaschinen meist einen sehr geringen Widerstand w_A giebt, ist der Spannungsverlust in den Ankerdrähten nur gering; die Klemmenspannung, die bei dieser Maschine mit der Bürstenspannung übereinstimmt, ist nur wenig von der EMK verschieden. Bei nicht zu kleinen Widerständen des äusseren Stromkreises wird durch Änderung dieses Widerstandes die Klemmenspannung nur wenig verändert. Nebenschlussmaschinen mit kleinem Ankerwiderstande verhalten sich demnach im praktischen Gebrauche beinahe wie Gleichspannungsmaschinen.

Wenn bei Maschinen der Ankerwiderstand einen grösseren Wert hat, oder wenn Schwankungen in der Umlaufszahl, Spannungsabfall infolge der Ankerrückwirkung oder infolge der Widerstandszunahme der erwähnten Drähte ausgeglichen werden sollen, schaltet man, um die Spannung unveränderlich zu machen, in den Nebenschluss, der

die Bewickelung der Feldmagnete enthält, einen Regulierwiderstand ein (vergleiche die Einrichtung von Regulierwiderständen, Kap. XIII, Abschn. 1, S. 266).

Das Güteverhältnis oder den Wirkungsgrad der Nebenschlussmaschine findet man durch folgende Betrachtung. Die im äusseren Stromkreise entwickelte nützliche Energiemenge ist $i^2 \cdot W$; im Anker wird die Energiemenge $(i + \mathfrak{i})^2 \cdot w_A$ in Stromwärme umgesetzt, in der Bewickelung der Feldmagnete die Energiemenge $\mathfrak{i}^2 \cdot w_F$. Der Wirkungsgrad η ist somit:

$$\eta = \frac{i^2 \cdot W}{i^2 W + (i + \mathfrak{i})^2 \cdot w_A + \mathfrak{i}^2 \cdot w_F} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

Man erkennt leicht, dass man, um η möglichst gross zu machen, den Ankerwiderstand w_A möglichst klein machen und die Stromstärke $\mathfrak{i}$ in der Bewickelung der Feldmagnete ebenfalls so klein machen muss, als dies aus anderen Gründen angängig ist.

5. Gemischte Maschinen, Gleichspannungsmaschinen.[1])

Bei Einzelanlagen für elektrische Beleuchtung wünscht man, um die Bedienung zu vereinfachen, öfters Dynamomaschinen zu verwenden, deren Klemmenspannung praktisch unveränderlich bleibt, auch wenn der Widerstand im äusseren Stromkreise erheblichen Schwankungen dadurch unterworfen wird, dass je nach Bedarf bald viele, bald wenige Lampen mit Strom zu versorgen sind.

Verwenden wir Nebenschlussmaschinen, so nimmt im allgemeinen die Spannung ab, wenn der äussere Widerstand durch Einschaltung einer grösseren Anzahl parallel geschalteter Lampen vermindert wird; mit der Klemmenspannung nimmt dann aber auch der zur Erregung der Feldmagnete dienende Strom $\mathfrak{i}$ ab.

Bei einer Hauptstrommaschine steigt dagegen die Spannung, wenn der äussere Widerstand verkleinert wird, weil mit dem Anwachsen der Stromstärke in gleichem Verhältnisse die Feldstärke zunimmt.

Eine selbstthätige Regelung der Spannung (unveränderliche Umdrehungszahl vorausgesetzt) kann man somit erlangen, wenn man die Feldmagnete mit zwei Wickelungen versieht, mit einer aus vielen Windungen dünnen Drahtes bestehenden Wickelung, die man in einen Nebenschluss zu den Bürsten oder zu dem äusseren Widerstande legt, und mit einer zweiten, im gleichen Sinne magnetisierend wirkenden Wickelung, die aus wenigen Windungen dicken Drahtes hergestellt wird.

---

[1]) Erfunden von Brush im Jahre 1875.

Im ersten Falle, wenn die im Nebenschluss liegende Wickelung an die Bürsten angeschlossen wird,[1]) ist die Stromstärke i im Anker:

$$i = \frac{\mathfrak{E}}{w_A + \frac{w_n (w_s + W)}{w_n + w_s + W}} \quad \ldots\ldots \quad 12)$$

wenn w_n den Widerstand der im Nebenschluss liegenden zahlreichen Windungen dünnen Drahtes und w_s den Widerstand der wenigen vom Hauptstrom durchflossenen Windungen dicken Drahtes bedeutet, die beide auf die Magnetschenkel gewickelt worden sind.

Im zweiten Falle, bei den gemischten Maschinen mit langem Nebenschluss, ist:

$$i = \frac{\mathfrak{E}}{w_A + w_s + \frac{w_n \cdot W}{w_n + W}} \quad \ldots\ldots \quad 13)$$

In Fig. 277 ist graphisch der Verlauf der Spannung (Ordinaten) als Funktion des äusseren Widerstandes dargestellt. Man erkennt, welchen Anteil der Spannung die Nebenschlusswickelung hervorbringt und welcher Teil der Spannung von den wenigen vom Hauptstrome durchflossenen Windungen erzeugt wird. Die Summe beider Wirkungen ergiebt dann sehr nahe die Spannung der Compoundwickelung. Es zeigt sich, dass von einer bestimmten Stelle an (in der Figur von der über M errichteten Ordinate an) die Klemmenspannung für verschiedene äussere Widerstände als unveränderlich angesehen werden kann.

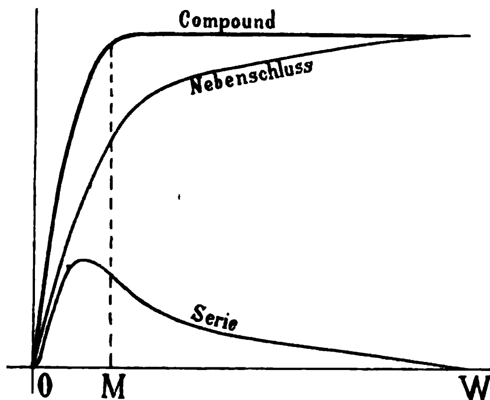


Fig. 277. Abhängigkeit der Spannung vom äusseren Widerstand bei einer Gleichspannungsmaschine.

Bei passender Wahl der beiden Wickelungen kann man es sowohl dahin bringen, dass die Klemmenspannung unveränderlich bleibt, als auch dahin, dass die Spannung an einem von der Maschine in bestimmtem Abstande in der Leitung entfernten Punkte bei verschiedener Belastung konstant ist, so lange die Umdrehungszahl sich nicht ändert. Im letzteren Falle muss der Nebenschluss

[1]) Einige Konstrukteure nennen solche Maschinen: Maschinen mit kurzem Nebenschluss.

eine etwas stärkere Wirkung erhalten als im anderen. Der Ausgleich, der durch beide Wickelungen hervorgebracht wird, besteht übrigens stets nur für eine bestimmte Umdrehungszahl u des Ankers.

Zur Bestimmung der Wirkungsgrade beider Schaltungsweisen führt folgende Betrachtung. Die nützliche, ausserhalb der Maschine verfügbare Arbeit ist in beiden Fällen $i^2 \cdot W$. Wenn die Nebenschlusswickelung von hohem Widerstande unmittelbar von den Bürsten abzweigt (Fig. 234 C, S. 355), so ist:

$$i_A = i + i_N,$$

wenn die Stromstärke im Anker mit i_A, im äusseren Widerstande mit i und im Nebenschluss mit i_N bezeichnet wird. Die Gesamtenergie besteht aus der nützlichen Arbeit $i^2 W$, ferner aus der im Anker erzeugten Stromwärme $i_A^2 \cdot w_A$, der Stromwärme, die im Nebenschluss entsteht $i_N^2 \cdot w_N$ und der Stromwärme $i^2 \cdot w_S$, die in der vom Hauptstrom durchflossenen Wickelung erzeugt wird, somit ist für die gemischte Maschine mit Nebenschluss zum Anker der Wirkungsgrad η:

$$\eta = \frac{i^2 W}{i^2 (w_S + W) + i_A^2 \cdot w_A + i_N^2 \cdot w_N}.$$

Die Klemmenspannung $\mathfrak{e}$ ist in diesem Falle:

$$\mathfrak{e} = \mathfrak{E} - i_A \cdot w_A.$$

Liegt jedoch die Nebenschlusswickelung parallel zum äusseren Widerstande (Fig. 234 D, S. 355), so fliesst der im Anker erzeugte Strom i_A auch durch die Hauptstromwickelung; dann ist die Klemmenspannung:

$$\mathfrak{e} = \mathfrak{E} - i_A \cdot (w_A + w_S)$$

und der Wirkungsgrad η wird:

$$\eta = \frac{i^2 W}{i^2 W + i_A^2 (w_A + w_S) + i_N^2 \cdot w_N}.$$

Jetzt werden gemischte Maschinen meist nur noch in kleineren Anlagen verwendet, in welchen keine ununterbrochene Beaufsichtigung der Maschine möglich ist, oder bei Stromerzeugern für Strassenbahneinrichtungen, bei welchen sehr plötzliche Stromschwankungen vorkommen, und der unvermeidlichen Verluste in den Leitungen wegen, die Klemmenspannung mit der Belastung wachsen muss.

6. Die Theorie der Gleichstrommaschinen in erster Annäherung.

Die Gleichung 1) für die EMK

$$\mathfrak{E} = \frac{m \cdot \Phi \cdot u \cdot p}{60 \cdot 10^8 \cdot a},$$

in der Φ die Anzahl der aus einem Nordpol aus- und in das Ankereisen eintretenden Kraftlinien, m die Zahl der auf dem Umfange des

Ankers vorhandenen Ankerdrähte, u die Zahl der Umdrehungen in einer Minute, p die halbe Polzahl und a die halbe Anzahl parallel geschalteter Ankerstromkreise bedeutet, zeigt, dass die EMK der Anzahl Φ der Kraftlinien proportional ist, die von den Ankerdrähten geschnitten wird.

Die Grösse Φ hängt von der Gestalt, der Grösse und den magnetischen Eigenschaften der Eisenmassen der Feldmagnete und des Ankers, der Zahl der Windungen, der Stromstärke, die durch die Windungen der Feldmagnete fliesst, und von der Stromstärke in den Ankerdrähten und deren Anzahl ab.

Der Einfachheit wegen betrachten wir zunächst eine zweipolige Hauptstrommaschine von Hufeisenform mit Ringanker (vgl. Fig. 234, A, S. 355) und vernachlässigen in erster Annäherung die durch die Rückwirkung des Ankers verursachte Verdrehung und Schwächung des Magnetfeldes (vergl. Kap. XIX, Abschn. 4, S. 365).

Für die Ermittelung des Magnetfeldes haben wir bereits im VI. Kapitel (Abschn. 4, S. 129 und Abschn. 7, S. 134) die nötigen Anweisungen gegeben. Hiernach ist z. B. für die als Beispiel gewählte Maschine:

$$\frac{4\pi}{10}\,\mathrm{n\,i} = \mathrm{l}_1 \cdot \mathrm{f}\,(\nu_1\,\mathfrak{B}_1) + 2\,\mathrm{l}_2 \cdot \nu_2 \cdot \mathfrak{B}_2 + \mathrm{l}_3\,\mathrm{f}\,(\nu_3 \cdot \mathfrak{B}_3) \quad . \quad 14)$$

und zwar bezeichnet n die Anzahl der Windungen auf beiden Magnetschenkeln, i die Stromstärke in der Bewickelung derselben; ni ist somit die Zahl der Ampèrewindungen, $\frac{4\pi}{10}$ ni die magnetomotorische Kraft F, durch die das Magnetfeld erregt wird. Ferner ist l_1 die in der geometrischen Achse gemessene mittlere Länge der Kraftlinien in den Magnetschenkeln, ν_1 der Streuungskoëffizient (vgl. S. 324), $\mathfrak{B}_1 = \frac{\Phi}{Q_1}$ die magnetische Induktion in den Schenkeln (Q_1 der Querschnitt des Schenkeleisens). $\mathfrak{B}_2$, l_2, ν_2 sind die entsprechenden Grössen in dem zwischen Polschuh und Ankereisen befindlichen Luftraum; während ν_3, $\mathfrak{B}_3$, l_3 Streuungskoëffizient, magnetische Induktion und mittlere Weglänge der Kraftlinien im Ankereisen bedeuten. Ferner ist f $(\nu\mathfrak{B})$ die unbekannte Funktion $\frac{\nu\mathfrak{B}}{\mu}$ (vergl. S. 135). Es kommt noch ein viertes Glied von der Form $\mathrm{l}_4\,\mathrm{f}\,(\nu_4\,\mathfrak{B}_4)$ auf der rechten Seite der Gleichung hinzu, wenn die Polschuhe von anderem Materiale oder anderem Querschnitt sind, als die Magnetschenkel. Ein weiteres Glied von der Form $\mathrm{l}_5 \cdot \mathrm{f}\,(\nu_5\,\mathfrak{B}_5)$ tritt hinzu, wenn das Joch des Elektromagneten, wie dies gelegentlich der Fall ist, aus einer anderen Eisensorte hergestellt ist und einen anderen Querschnitt hat, als die Eisenkerne der Magnetschenkel.

Um den Einfluss der einzelnen Teile, aus denen das Magnetfeld besteht, besser übersehen zu können, haben die Gebrüder Hopkinson für jeden der einzelnen Teile des Weges der Kraftlinien die Magnetisierungskurven besonders aufgestellt. Zu diesem Zwecke benutzen wir die Gleichung für die magnetomotorische Kraft in der Form, welche dieselbe anfänglich (in Kap. VI, Abschn. 7) besass, und wählen für den Anker und die doppelte Luftschicht den Streuungskoëffizienten 1 und für die übrigen Teile, Polstücke, Magnetschenkel und Joch den gemeinsamen Streuungskoëffizienten ν. Alsdann erhält die Gleichung die Form:

$$\frac{4\pi}{10}\cdot \mathrm{ni} = \Phi\cdot\left\{\frac{l_2}{Q_2}+\frac{l_3}{\mu_3 Q_3}\right\}+$$

$$+\nu\cdot\Phi\cdot\left\{\frac{l_1}{\mu_1 Q_1}+\frac{l_4}{\mu_4 Q_4}+\frac{l_5}{\mu_5 Q_5}\right\} \quad . \; . \; . \; . \quad 15)$$

Die rechte Seite kann in fünf Teile zerlegt werden:

$$F_1 = \frac{\nu\Phi l_1}{\mu_1 Q_1},\quad F_2 = \frac{\Phi l_2}{Q_2},\quad F_3 = \frac{\Phi l_3}{\mu_3 Q_3},$$

$$F_4 = \frac{\nu\Phi l_4}{\mu_4 Q_4},\quad F_5 = \frac{\nu\Phi l_5}{\mu_5 Q_5} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 16)$$

Für verschiedene Werte von $\frac{\Phi}{Q}$, der Kraftliniendichte $\mathfrak{B}$, als Ordinaten haben z. B. die Gebrüder Hopkinson für jeden der fünf Teile einer von ihnen untersuchten Dynamomaschine die zugehörigen Werte von F als Abscissen aufgetragen und dadurch die in nebenstehender Abbildung dargestellten Kurven A, B, H, C, G erhalten (vergl. Fig. 278). Die Kurve A bezieht sich auf das Ankereisen, B auf die beiden Luftschichten, H auf die Polschuhe, C auf das Schenkeleisen, G auf das Jochstück. Bei den doppelt gezeichneten Kurven bezieht sich der obere Teil auf die Beobachtungen bei abnehmendem, der untere auf die Beobachtungen bei zunehmendem Magnetismus.[1])

Man erhält die Grösse:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 17)$$

wenn man für irgend einen gegebenen Wert von $\frac{\Phi}{Q}$ die zugehörigen Abscissen addiert. Auf diese Weise ist die Kurve D, die Magnetisierungskurve der Maschine, entstanden, welche der Gleichung 11 entspricht. Um im Anker einen Kraftlinienstrom von Φ Kraftlinien zu erhalten, der durch die übrigen Teile des magnetischen Kreises

[1]) Unterschiede infolge der Hysteresis. (Kap. V, Abschn. 17, S. 118.)

der Maschine hindurch geht, muss eine magnetomotorische Gesamtkraft F aufgewendet werden, die gleich der Summe der magneto-

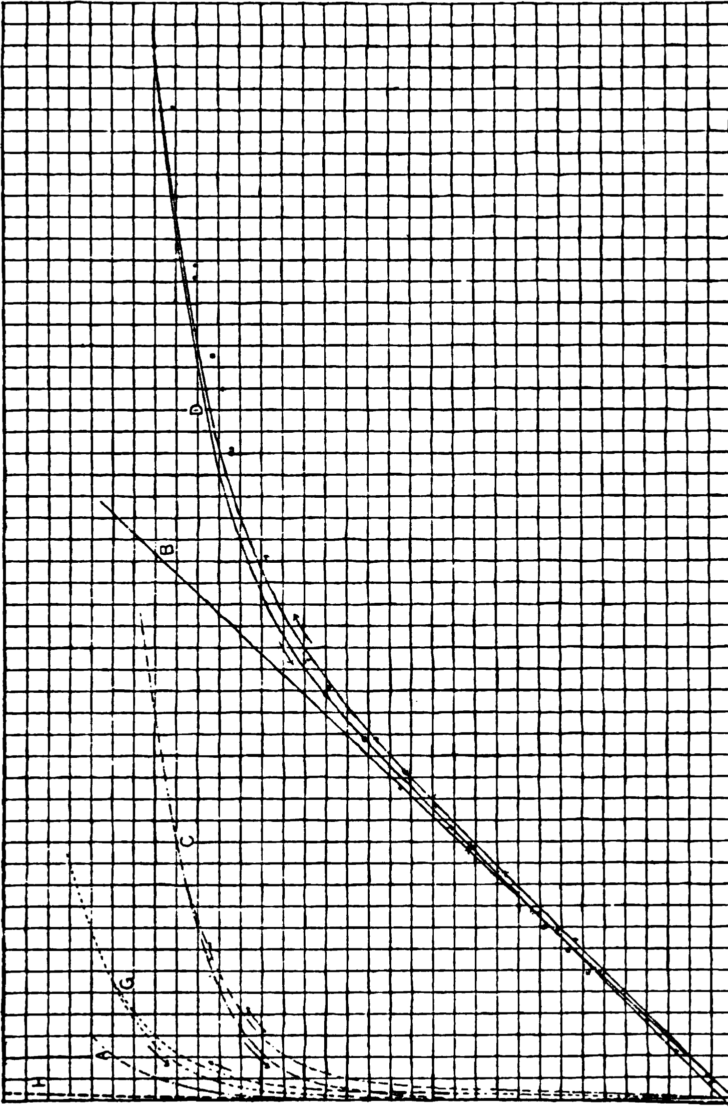


Fig. 278. Die Grössen $F = \frac{\nu \cdot \Phi \cdot l}{\mu \cdot Q}$ für die einzelnen Teile des magnetischen Kreises einer Dynamomaschine.

motorischen Kräfte ist, die erforderlich wären, in den übrigen Teilen einen Kraftlinienstrom $\nu \Phi$ hervorzurufen, wenn diese selbst einen in sich geschlossenen Kreis bildeten.

Anfänglich entfernt sich die Magnetisierungskurve D nicht erheblich von der dem Luftraume entsprechenden Geraden B, die nahezu eine Tangente am Anfang der Magnetisierungskurve ist; für geringere Sättigungen kommt also vorzugsweise nur der magnetische Widerstand des Luftraumes in Frage. Bei stärkeren Sättigungen macht sich der magnetische Widerstand der Eisenteile immer mehr geltend, weil die Permeabilität des Eisens mit zunehmender Sättigung rasch abnimmt. Zeigt eine der Kurven (in der Fig. 278 z. B. die Linie C) eine vorzeitige Wendung nach unten, so muss man entweder den Querschnitt dieses Eisenteiles oder seine Permeabilität vergrössern, oder die Länge des von den Kraftlinien zurückzulegenden Weges verringern. Durch eine solche Betrachtung waren die Gebrüder Hopkinson z. B. seiner Zeit dazu geführt worden, die langen, dünnen Magnetschenkel der alten Edisonmaschinen zu verkürzen und dicker zu machen.

Um die Richtigkeit des Verfahrens zu prüfen, hat Hopkinson die Feldmagnete der von ihm untersuchten Maschine durch den Strom einer Akkumulatorenbatterie erregt und bei offenem Stromkreise die Klemmenspannung mit einem Voltmeter gemessen. Mit Hilfe der Formel 1) hat er hierauf die Grösse Φ

$$\Phi = \frac{\varepsilon \cdot 10^8 \cdot 60}{n \cdot u} \qquad \qquad 18)$$

berechnet. Die auf diese Weise erhaltenen Werte sind als kleine Kreuze in die Figur eingetragen. Die Übereinstimmung ist, wie zu erwarten, keine vollständige, aber eine befriedigende.

7. Die Funkenbildung an den Bürsten.

Die Stromstärke, die im Höchstfalle dem Anker einer Dynamomaschine zugemutet werden darf, wird dadurch begrenzt, dass man entweder keine Bürstenstellung mehr finden kann, bei der sich der Richtungswechsel in den durch die Bürsten kurz geschlossenen Spulen funkenlos vollzieht, oder dadurch, dass die Temperatur der Ankerdrähte durch das übermässige Anwachsen der Stromstärke und die entwickelte Stromwärme nach dem Joule'schen Gesetze sich bedenklichen Grenzen nähert. Meist bedingt die zuerst angegebene Ursache früher ein Innehalten mit dem Anwachsen der Ankerstromstärke, als die an zweiter Stelle genannte.

Während der Dauer des Kurzschlusses einer Ankerspule muss der Strom in dieser Spule umgekehrt werden, und der Strom muss bereits wieder auf die normale Höhe gebracht sein, wenn die Bürste die Spule verlässt. (Vergl. Kap. XIX, Abschn. 4, S. 367.)

Die kurzgeschlossene Ankerspule muss sich also während der Dauer des Kurzschlusses in einem Felde bewegen, durch das eine EMK induziert wird, die im Zusammenwirken mit der Selbstinduktion der Spule die gewünschte Stromstärke hervorbringt. Die Änderung der Stromstärke am Ende des Kurzschlusses muss möglichst gleich Null sein, wenn die Funkenbildung an den Bürsten auf ein Minimum herabgebracht werden soll.

Diese Bedingung kann, da die Selbstinduktion die Richtungsänderung des Stromes zu verzögern sucht, nur erfüllt werden, wenn die kurzgeschlossene Spule sich in einem Felde bewegt, durch dessen Induktionswirkung der Richtungswechsel des Stromes beschleunigt wird.

Soll also die Funkenbildung möglichst gering ausfallen, so dürfen die Bürsten nicht in der neutralen Zone stehen, sondern sie müssen beim Stromerzeuger so weit in der Drehrichtung über dieselbe voraus, beim Elektromotor um so viel zurück gedreht werden, dass die kurzgeschlossene Spule in ein magnetisches Feld von passender Stärke gelangt. Diese Spule muss sich in einem schwachen Streufelde befinden, das von der Polecke ausgeht, dessen Intensität sich mit der Belastung der Maschine wenig ändert.

Um die Wirkung der Selbstinduktion zu verkleinern, würde man am besten glatte Anker benutzen; da aber Nutenanker sonst viele Vorzüge darbieten, wird man breite, wenig tiefe Nuten verwenden müssen. Bei tiefen, schmalen, halb oder ganz geschlossenen Nuten wird es, wegen der hohen Selbstinduktion, wesentlich schwieriger sein, einen völlig funkenfreien Gang zu erzielen.

Ebenfalls wegen der höheren Selbstinduktion der Wickelung werden Ringanker mehr zur Funkenbildung neigen als Trommelanker oder gar Scheibenanker.

Man kann deshalb Trommelanker um etwa 20% höher beanspruchen als Ringanker von gleichem Materialaufwand.

Von grosser Bedeutung für die Funkenbildung ist auch die Wahl möglichst grosser Auflageflächen für die Bürsten.

Die Funkenbildung ist auch um so geringer, je grösser die Lamellenzahl des Kollektors ist. [1])

8. Ankerrückwirkung. Gegenwindungen und Querwindungen.

Um die Änderungen übersehen zu können, die durch die magnetische Rückwirkung des Ankerstromes im Verlaufe der Kraft-

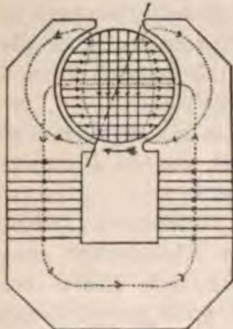
---

[1]) Eingehende theoretische Untersuchungen über die Bedingungen des funkenfreien Ganges elektrischer Maschinen finden sich bei E. Arnold, Die Ankerwickelungen und Ankerkonstruktionen. 3. Aufl. Berlin u. München 1899. S. 174 u. s. f.

linien veranlasst werden, denkt man sich nach dem Vorgange Swinburnes die magnetische Wirkung der Ankerwickelung durch die Wirkung zweier Gruppen von Windungen ersetzt, von welchen die einen parallel, die anderen senkrecht zum ursprünglichen Verlaufe der durch die Feldmagnete erzeugten magnetischen Kraftlinien sind.

Die senkrechten Windungen (in der Fig. 279 die vertikalen) erzeugen ein dem von der Wickelung der Feldmagnete veranlassten Kraftlinienstrom gerade entgegengesetztes Feld, sie schwächen somit das Feld. Dies sind die Gegenwindungen.

Die parallel gelegenen Windungen (in der Fig. 279 die horizontalen) veranlassen die Entstehung von zwei Kraftlinienfeldern (punktiert in der Figur gezeichnet), die im Ankereisen oben und unten zwei Doppelpole hervorbringen und sich durch die Polschuhe schliessen. Dies sind die Querwindungen. Sie sind die Veranlassung für die in Kap. XIX, Abschn. 4, S. 365, behandelte Verdrehung der neutralen Zone des Ankers.


Fig. 279. Gegenwindungen und Querwindungen eines Ankers.

Die Querwindungen üben aber auch eine indirekte Rückwirkung auf das Magnetfeld aus, indem sie eine Erhöhung der Kraftliniendichte und des magnetischen Widerstandes am ablaufenden Polhorn veranlassen (vergl. Kap. XIX, Abschn. 4, S. 367).

Die eine Gruppe Windungen wird begrenzt durch die Öffnung des doppelten Verschiebungswinkels der Bürsten. (Die in Fig. 279 durch die Ankerachse gezogene schräge Linie soll die Anlagestellen der Bürsten verbinden.) Die Gegenwindungen erfüllen den übrigen Teil der Ankeroberfläche.

In Wirklichkeit sind ja die Ankerwindungen in anderer Weise auf der Ankeroberfläche verteilt, als dies in Fig. 279 dargestellt ist. In magnetischer Beziehung aber kann man die Wirkung der Ankerwickelung durch die zwei aufeinander senkrechten Strombänder der Gegenwindungen und Querwindungen ersetzt denken.

Man erkennt auch aus dieser Art der Betrachtung, dass die Bürstenverschiebung um so kleiner ausfallen muss, je stärker das Magnetfeld ist, das von den Feldmagneten erzeugt wird, und je geringer der Strom ist, der die Ankerwickelungen durchfliesst.

Um die Einwirkung der Querwindungen zu schwächen, hat man z. B. bei den Magnetgestellen der sogenannten Manchestertype, und oft auch bei mehrpoligen Maschinen, die Polstücke von aussen ein-

gekerbt (vergl. Fig. 280), um auf diese Weise den magnetischen Widerstand der durch die Querwindungen erzeugten Kraftlinien zu erhöhen.

Bei mehrpoligen Maschinen wird oft aus demselben Grunde der Polschuh und Kern gespalten (vergl. Fig. 281). Da aber der grösste Teil des magnetischen Widerstandes von der Luftschicht zwischen Ankereisen und Polschuh herrührt, kann der Erfolg solcher Kunstgriffe nicht erheblich sein.

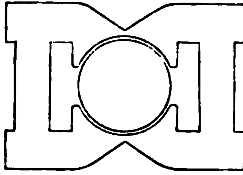


Fig. 280. Einkerbung zur Verminderung des Einflusses der Querwindungen.

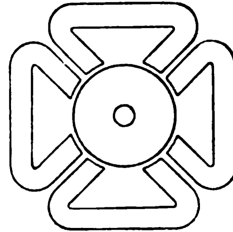


Fig. 281. Spaltung der Polschuhe, um den Einfluss der Ankerwindungen zu vermindern.

Die Anzahl der Gegenwindungen ist $\frac{\gamma m}{\pi}$, wenn m die Anzahl der Drähte auf der Ankeroberfläche, γ der Winkel der Bürstenverschiebung ist. Beträgt der Ankerstrom i_a und berücksichtigt man, dass bei der zweipoligen Maschine jeder Ankerdraht von der Hälfte dieser Stromstärke durchflossen wird, so ist die magnetomotorische Kraft der Gegenwindungen (vergl. Kap. VI, Abschn. 5, S. 130):

$$4\pi \cdot \frac{\gamma}{\pi} \cdot m \cdot \frac{i_a}{2}.$$

Es bleibt somit nur eine magnetomotorische Kraft von der Grösse:

$$F' = 4\pi \cdot \left(n\,i - \frac{\gamma}{\pi} \cdot m \cdot \frac{i_a}{2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 19)$$

wirksam.

Der resultierende Kraftlinienstrom Φ' wird: $\Phi' = \frac{F'}{\Sigma \frac{l}{Q \cdot \mu}}$.

Will man demnach für eine gegebene EMK eine bestimmte Feldstärke erhalten, so muss man die Anzahl n i der Ampèrewindungen des Magnetgestelles um den Betrag der Ampèrewindungen der Gegenwindungen erhöhen.

Die magnetomotorische Kraft der Querwindungen ist sehr nahe:

$$4\pi \cdot \frac{\beta}{2\pi} \cdot m \cdot \frac{i_a}{2},$$

wenn man mit β, das sehr nahe gleich $\pi - 2\gamma$ ist, den Öffnungswinkel β versteht, den jeder Polschuh umfasst.

Bei Bestimmung des Kraftlinienstromes, den diese Windungen hervorbringen, kann man von den magnetischen Widerständen im Ankereisen und im Polschuh, ihrer Kleinheit wegen, ganz absehen, und braucht nur den Widerstand des Luftraumes zwischen Ankereisen und Polschuh in Betracht zu ziehen. Derselbe ist $\frac{2\delta}{\frac{1}{2} q_{\mathfrak{L}}}$, wenn 2δ die doppelte Dicke der Luftschicht und $q_{\mathfrak{L}}$ ihr Querschnitt ist.

Man erhält dann für den Kraftlinienstrom Φ'' der Querwindungen

$$\Phi'' = \frac{\beta \cdot n \cdot i_a}{\frac{2\delta}{\frac{1}{2} q_{\mathfrak{L}}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

Wenn es gelingen soll, in den durch die Bürsten kurzgeschlossenen Windungen den Strom zu kommutieren, also Funkenbildung zu vermeiden, muss der Kraftlinienstrom Φ'' der Querwindungen kleiner sein, als der Kraftlinienstrom unter der betreffenden Polecke, d. h. es muss:

$$\frac{\Phi'}{2} > \Phi'' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 21)$$

sein.

Bezeichnet man mit $\mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} = \frac{\Phi'}{q_{\mathfrak{L}}}$ die Kraftliniendichte im Luftraume,

so muss demnach $\frac{m \cdot i_a}{10} < \frac{\mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} \cdot \delta}{2\beta}$

sein, oder wenn man β in Winkelgraden ausdrückt

$$m \cdot i_a < \frac{\mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} \cdot \delta \cdot 10}{2\beta \cdot \frac{2\pi}{360}} \qquad m \cdot i_a < \frac{288 \cdot \mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} \cdot \delta}{\beta} \quad . \quad . \quad 22)$$

Die Ampèrewindungen des Ankers $m \cdot i_a$ müssen erheblich unter dieser Grenze bleiben, wenn sich die Kommutation in der kurzgeschlossenen Spule nahezu funkenlos vollziehen soll.

In Wirklichkeit soll aber der Winkel der Bürstenverschiebung kleiner sein, als er sein würde, wenn sich die Kommutation unter der Kante des Polschuhes vollzöge. Die Praktiker rechnen als grössten zulässigen Verschiebungswinkel etwa ein Viertel des Winkels, um den die benachbarten Polkanten voneinander abstehen.

Dies wird nach Erfahrungen, die Esson gemacht hat, erreicht, wenn bei Ringmaschinen

$$m \cdot i_a < \frac{144 \cdot \mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} \cdot \delta}{\beta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 23)$$

und bei Trommelmaschinen

$$m \cdot i_a < \frac{192 \cdot \mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} \cdot \delta}{\beta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 24)$$

gemacht wird.

Diese Formeln bleiben auch ohne weiteres für mehrpolige Maschinen anwendbar, wenn man unter β den Öffnungswinkel jedes Polstückes versteht.

Fischer-Hinnen[1]) giebt hierfür die Formel:

$$\frac{4\pi}{10} \cdot b \cdot k \cdot \frac{1}{2\delta} < \mathfrak{B}_l$$

oder

$$m < \frac{10 \cdot \mathfrak{B}_l \cdot \delta \cdot p_1}{b \cdot i_a}.$$

Hierin ist b der Polbogen $b = \beta \cdot \frac{D \cdot \pi}{2p}$, D der Ankerdurchmesser δ die Dicke des Luftraumes, $\mathfrak{B}_l$ die Luftsättigung, herrührend von den Feldmagneten, und k ein Koëffizient, dessen Wert:

k = ...	90	100	115	130	145	160
für Kilowatt	5	10	20	40	100	150

ist. Für Ringanker sind die Werte von k etwas kleiner. Auch gelten diese Zahlen nur für Spannungen zwischen 100 und 150 Volt.

Die Ankerrückwirkung veranlasst einen mit der Belastung wachsenden Spannungsabfall, der bei glatten Ankern etwa das Doppelte, bei Nutenankern meist das Vier- bis Sechsfache des durch die Stromwärme im Anker veranlassten Spannungsverlustes ist.

Da nun beispielsweise bei einer vierpoligen Maschine β beinahe nur halb so gross ist, wie bei einer zweipoligen, so erkennt man daraus, dass man für gleiche Bürstenverschiebung einer vierpoligen Maschine beinahe doppelt so viel Strom entnehmen kann, als einer zweipoligen, ehe lebhaftere Funkenbildung eintritt. Hierin liegt ein beachtlicher Vorzug mehrpoliger Maschinen begründet.

Hauptstrommaschinen und gemischte Maschinen bedürfen bei wachsender Belastung nur geringerer Veränderungen der Bürstenstellung, weil mit dem Wachsen des Ankerstromes die Feldstärke beinahe proportional wächst. Bei den Nebenschlussmaschinen aber hat der Strom, der durch die Feldwickelungen fliesst, die Tendenz, mit zunehmender Belastung abzunehmen. Man muss deshalb bei wachsender Belastung die Bürstenverschiebung vergrössern, um die Anzahl der Ampèrewindungen der Querwindungen zu verringern.

9. Hilfsmittel, um Ankerrückwirkung und Funkenbildung zu vermindern.

Um die Bürstenverschiebung zu vermindern, oder sie gänzlich zu vermeiden, sind gelegentlich nach dem Vorschlage von Fischer-

[1]) Fischer-Hinnen, Die Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion elektrischer Gleichstrommaschinen. Zürich, Raustein, 4. Aufl. 1899, S. 8.

Hinnen kleine Hilfspole angeordnet worden, deren Wirkung derjenigen der Querwindungen entgegengesetzt ist. Um diese Pole führt man eine angemessene Anzahl von Windungen des Ankerstromes, sodass die Wirkung dieser Pole mit der Belastung zunimmt.

Zuerst von Fischer-Hinnen und wenig später von Ryan ist vorgeschlagen worden, um den Anker aussen herum eine Anzahl vom Ankerstrom durchflossener Windungen zu führen, die in Kanälen verlaufen, die in die Polstücke eingebohrt oder eingefräst sind. Man sendet den Ankerstrom in einer solchen Richtung durch die Drähte, dass die Wirkung der Querwindungen für jede Belastung

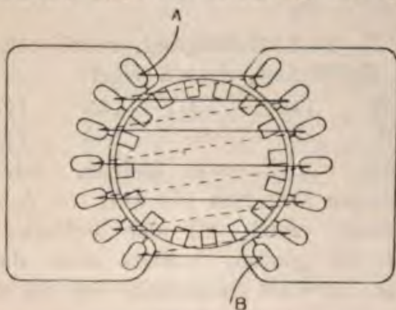


Fig. 282. Hilfswindungen zur Aufhebung des Quermagnetismus.



Fig. 283. Anordnung zur Verminderung der Ankerrückwirkung von Lundell.

aufgehoben und damit auch die Bürstenverschiebung vermieden wird (vergl. Fig. 282).

Mordey und auch Brown[1]) haben symmetrische Wickelungen der Anker ausgedacht, durch welche die Ankerrückwirkung sehr vermindert wird. Sie verlegen eine Anzahl Windungen einer jeden Ankerspule derart nach vorwärts oder rückwärts, dass durch die vorwärts oder rückwärts liegende Polecke während der Kurzschlussperiode in diesen Windungen eine EMK induziert wird, die ausreicht, den Strom der kurzgeschlossenen Spule zu kommutieren. Die in der neutralen Zone gelegenen Windungen dieser Art heben die magnetisierende Wirkung der Gegenwindungen zum grossen Teil auf.

Wir wollen ferner nicht unterlassen, daran zu erinnern, dass auch bei den Wickelungen mit verkürztem Schritt, den sogenannten Sehnenwickelungen, wie sie zuerst wohl Swinburne und Mordey angewendet haben (vergl. Kap. XIX, Abschn. 11, S. 381, Fig. 263), die entmagnetisierende Wirkung des Ankers sehr klein bleibt, wenn man die Spulenweite (Sehnenlänge) so wählt, dass, wenn die eine Seite der Spule an der einen Polecke anlangt, die andere Seite die

[1]) Englisches Patent No. 21 971 vom 3. Okt. 1896. Vergl. auch die ausführliche Darstellung in Arnold, Die Ankerwickelungen, 3. Aufl., S. 202 u. s. f.

andere Ecke desselben Poles verlässt. Die Leiter, welche zwischen den kurzgeschlossenen Spulen liegen, werden abwechselnd in entgegengesetzter Richtung vom Strome durchflossen und üben deshalb keine entmagnetisierende Rückwirkung aus.

Lundell hat bei neuen Bahngeneratoren mit Compounderregung auf eine sehr einfache Weise den schädlichen Einfluss der Ankerrückwirkung auszugleichen gesucht. Er erreicht das durch eine eigenartige Formgebung der Pole.

Wie man aus der Fig. 283 ersieht, spaltet er den aus Blechen bestehenden Magnetpol durch einen fast bis zur Polbohrung reichenden Schlitz in die beiden Teile gleichen Querschnittes a und b. Der Teil b jedoch, der im Sinne der Rotation des Ankers nach vorn liegt, erhält einen wesentlich grösseren Polbogen als der Teil a. So lange die erregenden Ampèrewindungen gering sind, ist die magnetische Induktion an allen Teilen der Poloberfläche die gleiche; es muss daher der Teil b mehr Kraftlinien führen als a. Die Erregerspulen sind z. B. so bemessen, dass die magnetische Induktion im Teil b etwa 16500 beträgt, wenn die Maschine keinen Strom giebt, also nur der Nebenschluss die Erregung besorgt, und nur 10500 im Teile a. Giebt aber die Maschine Strom, so treten zwei neue Einflüsse auf. Die Ankerrückwirkung sucht die Induktion in dem unter a gelegenen Teile zu verringern und in dem unter b gelegenen Teile zu vergrössern; es würde also unter dem alleinigen Einfluss des Ankerfeldes eine Vergrösserung der Induktion im rechts gelegenen Teile und eine Verminderung im links gelegenen Teile erfolgen. Die vom Ankerstrom durchflossene Hauptstromwickelung jedoch wird die Induktion in a in weit höherem Masse zu vergrössern suchen, als in b, weil hier die Sättigungsgrenze näher liegt und die Linien zum Teil ihren Weg demzufolge durch a nehmen müssen. Es würde also unter dem Einfluss nur dieser Ampèrewindungen eine Vergrösserung der Induktion in den Teilen unter a und eine Verminderung in den Teilen unter b stattfinden. Die beiden entgegengesetzt gerichteten Wirkungen der Hauptstromwickelung der Feldmagnete und der Ankerwindungen heben sich zum Teil auf und die Verzerrung des Ankerfeldes wird vermindert.

Besonders zur Vermeidung der Funkenbildung und Bürstenverschiebung hat Sayers[1]) eigentümliche Ankerwickelungen angegeben. Er verbindet die Ankerspulen A, A′, A″ . . . durch zwischengeschaltete Hilfsspulen C, C′, C″ mit dem Kollektor (vergl.

[1]) D. R.-P. No. 73119 vom 1. Mai 1892 und D. R.-P. No. 78954 vom 31. Dezember 1893.

Fig. 284), die nach rückwärts verschoben und entgegengesetzt gewickelt sind, wie die Hauptspulen. Wenn die Hauptspule durch die Bürsten geschlossen wird, durchlaufen diese Hilfsspulen gerade die unter der Ecke des Polschuhes gelegenen Stellen. Es wird dadurch in diesen Hilfsspulen eine E M K induziert, durch die nicht nur die E M K der Selbstinduktion der kurzgeschlossenen Spule aufgehoben, sondern auch in jedem Augenblick des Kurzschlusses die Stromstärke erzeugt wird, die nötig ist, um einen funkenlosen Richtungswechsel des Stromes hervorzurufen. Die in Fig. 284 angegebenen Pfeile zeigen die Richtungen der induzierten E M Kräfte in den zwischen den durch die Bürste a kurzgeschlossenen Kollektorsegmenten β'', β' gelegenen Spulen an.

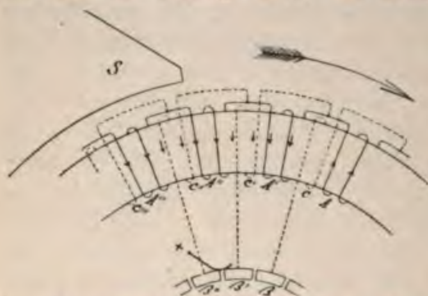


Fig. 284. Ankerwickelung von Sayer zur Verminderung der Ankerrückwirkung.

Häufig gebraucht Sayers auch die zweite Wickelung unter gleichzeitiger Anwendung von Hilfspolen.

Fischer-Hinnen hat auch, um die Selbstinduktion der kurzgeschlossenen Ankerspule und dadurch die Bürstenverschiebung zu verringern, die Windungen einer Spule auf mehrere Nuten verteilt.

Wirksam sind die hier angegebenen Hilfsmittel sämtlich, aber sie verwickeln die Konstruktionen der Maschinen ausserordentlich, und sie veranlassen stets gewisse, unvermeidliche Verluste. In der Praxis wird daher von diesen geistvoll ausgedachten Kunstgriffen nur in wenigen, besonderen Fällen Gebrauch gemacht.

Das einfachste und beste Mittel, um das Auftreten zu starker Extraströme in den kurzgeschlossenen Windungen und damit lebhafte Funkenbildung zu vermeiden, ist die Anwendung einer grossen Zahl von Kollektorlamellen und der Gebrauch von Kohlenbürsten. Kohlenbürsten schalten einen erheblich grösseren Übergangswiderstand in den Kurzschluss ein, als Metallbürsten, und die Funkenbildung ist auf eine 4 bis 6 mal grössere Berührungsfläche verteilt.

XXI. Kapitel.

Berechnung des Ankers von Gleichstrommaschinen.

1. Allgemeine Vorbemerkungen.

Wenn eine Dynamomaschine konstruiert werden soll, die dazu bestimmt ist, als Stromerzeuger zu dienen, sind zumeist durch die Verhältnisse der Anlage, für deren Betrieb die Maschine verwendet werden soll, die Klemmenspannung e und die Stromstärke I von Anfang an bestimmt; vielfach ist auch für die Umlaufszahl des Ankers u wenigstens eine obere Grenze gegeben. Über die anzuwendende Schaltung, ob eine Reihenmaschine oder eine Nebenschlussmaschine oder eine Gleichspannungsmaschine zu wählen ist, ferner, ob man einen Ringanker, einen Trommelanker mit oder ohne Nuten oder einen Scheibenanker anwenden will, endlich, welche Polzahl benutzt werden soll, entscheiden zumeist Gründe, auf die hier nicht näher einzugehen nötig ist, da das Erforderliche über Vorzüge und Nachteile der verschiedenen Anordnungen bereits in dem vorhergehenden Kapitel mitgeteilt worden ist. Auch über die Verluste an elektrischer Energie, die man im Anker und in den Feldmagneten zulassen will, muss man sich von vornherein schlüssig machen. Im Anker werden meist 1 % bis 8 % und in den Feldmagneten 1 % bis 7 % zugelassen. Im allgemeinen vermindern sich diese Verluste mit der Grösse der Maschinen.

Wenn die Betriebskraft verhältnismässig billig zu haben ist (Wasserkraft, überschüssige Dampfkraft), wird man zweckmässig grössere Energieverluste zulassen und billige Maschinen anwenden; wenn dagegen kostspielige Betriebsarten (Benzin-, Gas-, Petroleummotoren, kleine Dampfmaschinen, an Wasserleitungen anzuschliessende Motoren) benutzt werden müssen, ist es richtiger, die unvermeidlichen Verluste in der elektrischen Maschine möglichst klein zu machen. Eine besondere Rechnung muss darüber entscheiden, wie das Mehr oder Weniger an Kosten der Betriebskraft für die vorgeschriebene Jahresleistung sich zu den Zinsen nebst den Kosten der Amortisation des Anschaffungspreises der Maschine verhält. Mit der

Verminderung der Verluste, der Erhöhung des Wirkungsgrades steigen die Kosten der Maschinen sehr bedeutend.

Mit der Vergrösserung der Verluste wächst die Wärmeentwickelung in der Maschine. Eine grössere Erwärmung der Ankerdrähte als bis auf 40° C. über die Temperatur der Umgebung darf nur in seltenen Fällen zugelassen werden. Erreichen die Ankerdrähte Temperaturen über 80° C., so gehen Umspinnung und Isolation rasch zu Grunde.

Die Berechnung einer neu zu konstruierenden Dynamomaschine zerfällt in drei Hauptteile:

1. Zunächst entscheidet man über Polzahl und Art der Ankerkonstruktion (glatte, Nuten-, Lochanker).
2. Sodann bestimmt man die Ankerabmessungen unter Annahme einer bestimmten Gesamtzahl Φ der Kraftlinien oder der Sättigung $\mathfrak{B}_g$ im Luftzwischenraum.
3. Man ermittelt die Abmessungen der Feldmagnete und der Bewickelung derselben, die zur Erreichung dieser magnetischen Induktion erforderlich sind.

2. Arten der Anker.

Für die folgenden Betrachtungen ist es oft nötig, die verschiedenen Ankerkonstruktionen getrennt zu behandeln.

Nach der Art der Aufbringung der Ankerdrähte auf den aus Eisenblechen zusammengesetzten Ankerkörper unterscheidet man:



Fig. 285. a) glatter Anker, b) gewöhnlicher Nutenanker, c) Nutenanker mit übergreifenden Zähnen, d) und e) Lochanker.

a) Glatte Anker (vgl. Fig. 285 (a).
b) Nuten- oder Zackenanker (vgl. Fig. 285) mit geraden (b) oder T förmigen Zähnen (c).
c) Lochanker (Fig. 285 (d u. e).

Glatte Anker sind zwar am wenigsten kostspielig in der Herstellung, es ist aber ein grosser Luftzwischenraum zwischen Eisen des Ankers und den Feldmagneten nötig, und dies bedingt eine grössere Anzahl von Ampèrewindungen auf den Feldmagneten und gestattet nur die Verwendung geringer Sättigung.

Grammeringe werden noch immer zumeist mit glatten Ankern versehen.

Glatte Anker lassen sich zuverlässiger isolieren; wegen des grossen Luftzwischenraumes ist Ankerrückwirkung und Bürstenverstellung geringer.

Bei Nutenankern bedarf man keiner Mitnehmer für die Drähte. Die Drähte sind vorzüglich gegen Beschädigungen geschützt. Der Luftzwischenraum kann sehr klein gewählt werden.

Lochanker sind deshalb weniger für Gleichstrommaschinen empfehlenswert, weil die Selbstinduktion der Ankerwickelung durch den geringen magnetischen Widerstand erhöht wird, es daher schwer ist, funkenlosen Gang zu erzielen.

3. Verluste, die im Anker auftreten.

Der Anker einer elektrischen Maschine giebt zur Entstehung verschiedener Verluste Anlass.

Durch die Umsetzung von elektrischer Energie in Wärme infolge des Leitungswiderstandes w_a der Ankerwickelung entsteht einerseits ein Spannungsverlust gleich $i_a \cdot w_a$, anderseits wird für die erzeugte Wärme eine gewisse Menge der erzeugten elektrischen Energie, nämlich $i_a^2 \cdot w_a$ verbraucht.

Anderweite Verluste entstehen durch die Arbeit, die infolge der Hysteresis zur Ummagnetisierung der Ankerbleche verbraucht wird.

Steinmetz hat für diesen Verlust die Formel gegeben:

$$\mathfrak{V}_{kryst} = 10^{-7} \cdot \eta \cdot \frac{p \cdot u}{60} \cdot \mathfrak{B}_a^{1,6} \cdot V \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Hierin ist η ein von der Beschaffenheit des Eisens abhängiger Koëffizient, dessen Wert zwischen 0,003 und 0,008 liegt, p die Anzahl der Polpaare, u die Umdrehungszahl in einer Minute, $\mathfrak{B}_a$ die magnetische Induktion im Ankereisen und V das Eisenvolumen des Ankers in *ccm*. Neuere Untersuchen haben übrigens gezeigt, dass diese Formel nicht ganz zutreffend ist.

Ferner ist auch bei der besten Konstruktion des Ankers die Entstehung von Wirbelströmen in den Metallteilen des Ankers, in Eisen und Kupfer nicht zu vermeiden. Die für Hysteresis und Wirbelströme verbrauchte Energie wird ebenfalls in Wärme umgesetzt.

Die Verluste durch Wirbelströme können annäherungsweise durch die Formel

$$\mathfrak{V}_{Wirb} = 10^{-9} \cdot c \cdot d^2 \cdot \left(\frac{p \cdot u}{60}\right)^2 \cdot \mathfrak{B}_a^2 \cdot V \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

dargestellt werden, worin c ein Koëffizient, dessen Wert zwischen 2,5 und 8 liegt. d bedeutet die Dicke der Ankerbleche in *mm*.

Nicht zu vernachlässigen sind ferner die Verluste, die durch Achsen- und Bürstenreibung und Luftwiderstand entstehen.

Die Ankerrückwirkung veranlasst zwar keinen unmittelbaren Arbeitsverbrauch, aber sie vermindert die Leistung der Maschine,

veranlasst eine Vergrösserung des Materialaufwandes und verursacht einen mit zunehmender Belastung wachsenden Spannungsabfall.

Endlich kommt noch ein weiterer Verlust hinzu, der durch die Funkenbildung an den Bürsten verursacht wird.

4. Vorläufige Berechnung des Ankers.

Durch die praktische Erfahrung haben sich für die verschiedenen Maschinenarten bereits gewisse Regeln für die Abmessungen des Ankers herausgebildet. Erhebliche Abweichungen von diesen Verhältniszahlen sind selten.

Bei zweipoligen Maschinen mit Ringanker wählt man z. B. die Länge des Eisenkernes 0,8 bis 1,2 mal dem Durchmesser und den inneren Radius des Eisenkernes nahezu 0,6 des äusseren Durchmessers.

Für Ringanker wählt man meist einen der oberen Grenze näherliegenden Wert, weil sonst, zumal bei kleinen Maschinen, die Unterbringung des Drahtes auf der Innenseite des Ringes Schwierigkeiten macht.

Bei Trommelankern wählt man die Länge etwa 0,9 bis 1,50 mal so gross, als den Durchmesser und den inneren Durchmesser der Eisenscheiben etwa gleich $^1/_3$ des äusseren Durchmessers. Letztere Grösse wird so gewählt, dass die gewünschte magnetische Sättigung des Ankereisens erreicht wird.

Bei vierpoligen Maschinen werden die Längen des Ringankers ungefähr gleich $^1/_3$ bis 0,8 des Durchmessers und die Länge des Trommelankers gleich $^1/_2$ bis 0,8 des Durchmessers gewählt.

Bei achtpoligen Maschinen setzt man meist $l = 0,5\ D$ bis $0,35 D$.

Für 10polige Maschinen schwankt l zwischen $^1/_4$ D und $^1/_3$ D, und für Maschinen mit noch grösserer Polzahl, die meist mit Trommelanker versehen werden, ist $l = 0,16\ D$ bis $0,18\ D$.

Kennt man die relativen Verhältnisse des Ankers, so ermittelt man die absoluten entweder aus der linearen Geschwindigkeit, mit der sich die Drähte (Formel 11 u. 12) bewegen sollen, oder aus der zur Abkühlung erforderlichen Oberfläche (Formel 8 und 9).

Man bestimmt zunächst die Dicke des Drahtes, mit dem der Anker bewickelt werden soll, und diese hängt ab von der Stromstärke i_a, die im Ankerdrahte fliessen soll, und von der Belastung für jeden Quadratmillimeter Kupferquerschnitt, die man mit Rücksicht auf den Spannungsverlust im Anker und die zulässige Erwärmung des Ankers gestatten will.

Nennt man die zulässige Belastung B, so ist der zu wählende Querschnitt q des Ankerdrahtes:

$$q = \frac{i_a}{2\,B_a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

und der Durchmesser des Drahtes d

$$d = \sqrt{\frac{4\,q}{\pi}} = \sqrt{\frac{2\,i_a}{\pi \cdot B_a}}.$$

Sind bei mehrpoligen Maschinen mehr als 2, nämlich a, Paare von Ankerstromkreisen vorhanden, so nimmt diese Formel die Gestalt an:

$$d = \sqrt{\frac{2\,i_a}{\pi \cdot B \cdot a}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Für B kann man setzen: $B = C \cdot \frac{i_a}{u}$, worin die Konstante C zwischen 0,009 und 0,03 zu wählen ist.

Da es nicht ratsam ist, die Querschnittsbelastung B willkürlich oder nach rohen Annahmen zu wählen, berechnet man meist q aus der praktisch erprobten Regel, dass der Ankerverlust $i_a^2 \cdot w_a$ in Watt ungefähr $^1/_{10}$ der Ankeroberfläche in *qcm* betragen soll. Erfahrungsmässig ist dann die Abkühlung eine so gute, dass keine bedenkliche Erwärmung eintritt.

Nach einer von E. Schulz[1]) auf Grund dieser Annahme entwickelten Formel ist:

für den Trommelanker

$$q = i_a^2 \cdot \frac{0{,}0048 \cdot m \cdot \left(l + \frac{6{,}4}{p} \cdot D\right)}{a^2 \cdot D \cdot \left(\frac{D}{2} + l\right)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

für den Ringanker

$$q = i_a^2 \cdot \frac{0{,}0048 \cdot m\,(l + 8 \cdot [D - D_1])}{a^2 \cdot (D + D_1) \cdot \left(\frac{D - D_1}{2} + l\right)} \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Hierin ist l die Länge des Ankers in *cm* (Abstand des Kollektorendes vom Ankerende), m die Anzahl der Ankerwindungen, D der äussere, D_1 der innere Ankerdurchmesser in *cm*, p die halbe Zahl der Pole, a die halbe Zahl der parallelen Ankerwickelungen. Man erhält dann q in *qcm*.

Da es sich zunächst nur um eine vorläufige Ermittelung handelt, bei der es auf grosse Genauigkeit nicht ankommt, so bestimmt man die in diese Formeln eingehenden Grössen vorläufig näherungsweise.

[1]) E. Schulz, Praktische Dynamokonstruktionen, 2. Aufl., Berlin-München, Springer-Oldenbourg, S. 27 u. s. f.

Für eine vorläufige Bestimmung des Durchmessers D des Ankers in *cm* wählt man auf Grund praktischer Erfahrungen, wenn mit λ das Verhältnis Länge durch Durchmesser bezeichnet wird (nach Esson), ungefähr:

$$D = \mathfrak{C} \sqrt[3]{\frac{E \cdot i_a}{\lambda \cdot u}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

(E = EMK,[1]) i_a Stromstärke im Anker, u Umdrehungszahl des Ankers in der Minute.)

Diese Formeln geben für Maschinen zwischen 1 und 1000 Kilowatt brauchbare Werte, wenn man für $\mathfrak{C}$ die Werte ungefähr nach folgender Tabelle wählt:

Leistung der Maschine in Kilowatt	1	5	10	15	20	50	100	200	1000
$\mathfrak{C}$ für Ringanker	19	17	13,5	12,5	12,2	11	10	10	10
$\mathfrak{C}$ für Trommelanker	15	13,5	12	11	11	10	9	9	9

Für noch kleinere Maschinen muss der Durchmesser des Ankers grösser gewählt werden.

Vielfach wird der Ankerdurchmesser D nach den Massverhältnissen anderer erprobter Maschinen gleicher Konstruktion und ähnlicher Leistung (J · E) gewählt.

Aus der für gut konstruierte Maschinen wohl bewährten Annahme: 10 facher Ankerverlust in Watt, gleich Ankeroberfläche in Quadratcentimeter, lässt sich auch eine einfache Formel ableiten.

Nimmt man an, die Maschine sei für eine Leistung von $L = E \cdot i$ Watt bestimmt, und für den Anker wolle man einen Verlust V von $\mathfrak{p}$ Prozent zulassen, so ist der Ankerverlust:

$$V = \frac{L \cdot p}{100} = \frac{E \cdot i \cdot \mathfrak{p}}{100} \text{ Watt.}$$

Setzt man die Ankerlänge $l = \lambda \cdot D$, so ist:

Beim Trommelanker

die Oberfläche des Ankers gleich der Mantelfläche $l \cdot D \cdot \pi$, vermehrt um den doppelten Inhalt der Endkreise $2 \cdot \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$. Demnach gilt die Gleichung:

$$10\, V = \lambda \cdot D \cdot D \cdot \pi + \frac{D^2 \cdot \pi}{2}$$

aus der folgt:

$$D = \sqrt{\frac{20\, V}{\pi\,(2\,\lambda + 1)}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Beim Ringanker

besteht die Ankeroberfläche aus der Summe der äusseren und

[1]) Bürstenspannung + Spannungsverlust durch Stromwärme + Spannungsverlust durch Ankerrückwirkung.

inneren Cylinderoberfläche und dem Doppelten der ringförmigen Endfläche, und ist somit:

$$D \cdot l \cdot \pi + D_1 \cdot l \cdot \pi + 2 \cdot \left(\frac{D^2 \cdot \pi}{4} - \frac{D_1{}^2 \cdot \pi}{4} \right).$$

Setzt man nun wieder $l = \lambda \cdot D$ und $D_1 = \mu \cdot D$, so erhält man:

$$10\,V = D^2 \cdot \lambda \cdot \pi + D^2 \cdot \lambda \cdot \mu \cdot \pi + \frac{1}{2} D^2 \cdot \pi - \frac{1}{2} D^2 \cdot \mu^2 \cdot \pi.$$

Hieraus ergiebt sich:

$$D = \sqrt{\frac{20\,V}{\pi \left\{ 2\lambda + 2\lambda \cdot \mu + 1 - \mu^2 \right\}}} \quad \ldots \ldots \quad 9)$$

Für λ und μ sind schon vorher (S. 422) die Grenzen der üblichen Mittelwerte angegeben worden. Aus den zahlreichen Konstruktionsbeispielen, die in den bekannten Werken Kapp, Elektromechanische Konstruktionen, Fischer-Hinnen, Die Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion elektrischer Gleichstrommaschinen, Krämer, Konstruktion und Berechnung der Dynamo-Gleichstrommaschinen und Arnold, Ankerkonstruktionen, mitgeteilt sind, kann man sich über passende Verhältniszahlen μ und λ leicht Rat erholen, wenn man ausgeführte Maschinen, die man als Muster benutzen darf, nicht zur Verfügung haben sollte. Ausserdem ist der Betrag der Faktoren λ und μ für die Qualität der Maschinen ziemlich ohne Belang, so lange nicht extreme Werte gewählt werden.

Hat man D gefunden, so ergiebt sich die Länge l des Ankers:

$$\left. \begin{aligned} l &= \lambda \cdot D \\ \text{und } D_1 &= \mu \cdot D \end{aligned} \right\} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 10)$$

Für die Ermittelung der Anzahl m der Ankerdrähte, die auch in diese Formel eingeht, benutzt man die Formeln (vergl. S. 397):

$$E = \frac{2\,m \cdot \Phi \cdot u \cdot p}{a \cdot 60 \cdot 10^8} \text{ für Trommelanker} \quad \ldots \quad 11)$$

$$E = \frac{m \cdot \Phi \cdot u \cdot p}{a \cdot 60 \cdot 10^8} \text{ für Ringanker} \quad \ldots \ldots \quad 12)$$

Nun ist aber $\Phi = Q_2 \cdot \mathfrak{B}_2$,
wenn Q_2 den Querschnitt und $\mathfrak{B}_2$ die spezifische Kraftliniendichte im Polschuh bezeichnet.

Hierin ist $Q_2 = l \cdot c$, wenn c die Breite des Polschuhs bedeutet. $\mathfrak{B}_2$ wird zweckmässig bei einem Voranschlage etwa gleich 7000 und c nach der hier folgenden Tabelle gewählt.

Bei zweipoligen Maschinen	$c = 0{,}86$ D
» vier » »	$c = 0{,}5$ D
» sechs » »	$c = 0{,}34$ D
» acht » »	$c = 0{,}26$ D
» zwölf » »	$c = 0{,}17$ D

Die gesamte Anzahl der Ankerwindungen m ist:

$$m = m_1 \cdot m_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

wenn m_1 die Zahl der Drähte in einer Lage und m_2 die Zahl der Drahtlagen auf dem Anker bezeichnet. Es muss m eine gerade Zahl und durch die Zahl der Kollektorsegmente m_3 teilbar sein.

Die Zahl der Kollektorsegmente m_3 wählt man nach E. Arnold[1] ungefähr gleich:

$$m_3 \geqq 0{,}04 \cdot m \cdot \sqrt{i_a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

Hierin ist m die Drahtzahl am Ankerumfange, i_a die Stromstärke in jedem Ankerstromkreise. Stets wählt man m_3 möglichst gross.

Nachdem m bestimmt ist, ermittelt man aus der Gleichung für die EMK (vergl. Kap. XX, Abschn. 1, S. 397)

$$\Phi = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8 \cdot a}{m \cdot u \cdot p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

die Anzahl der Kraftlinien, die aus jedem Nordpole in das Ankereisen eintreten müssen, um die EMK zu erzeugen.

Unter EMK versteht man hierbei die Summe aus der Klemmenspannung, dem Spannungsverlust im Anker und einem etwa zwei- bis viermal grösseren Betrag für den Spannungsabfall durch die Ankerrückwirkung.

Wir finden die Anzahl der Kraftlinien in einem Quadratcentimeter Fläche oder die Kraftliniendichte $\mathfrak{B}_a$ im Anker, wenn wir die gesamte Kraftlinienzahl Φ durch den gesamten Eisenquerschnitt des Ankers Q_3 dividieren. Nun ist aber:

$$Q_3 = (D - D_1) \cdot l \cdot \varkappa = D^2 \cdot (1 - \mu) \cdot \varkappa \cdot \lambda \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

Hierin ist D_1 der innere Durchmesser des Ankereisens

$$\varkappa = \frac{\text{Dicke einer Blechscheibe}}{\text{Dicke einer Blechscheibe} + \text{Papierisolation}}$$

und

$$\mu = \frac{D_1}{D}.$$

Dann wird:

$$\mathfrak{B}_a = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8 \cdot a}{m \cdot u \cdot p \cdot (D - D_1) \cdot l \cdot \varkappa} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 17)$$

Diese Zahl $\mathfrak{B}_a$ soll für Ringanker zwischen 12000 und 18000, für Trommelanker zwischen 10000 und 12000 liegen.

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so muss man passende Änderungen vornehmen, z. B. die Dicke des Ankerdrahtes, beziehentlich seine Belastung anders wählen. Wenn $\mathfrak{B}_a$ zu gross gefunden worden ist, muss man den Querschnitt des Ankers vergrössern, und dies erfordert einen grösseren Durchmesser D, der sich von selbst ergiebt, wenn man die Belastung B des Drahtquerschnittes verkleinert, d. h. den Ankerdraht dicker wählt.

[1]) E. Arnold, Ankerwickelungen, 3. Aufl., S. 278.

5. Genauere Berechnung des Ankers.

Zunächst bestimmt man $\mathfrak{E}$, indem man zu der gegebenen Klemmenspannung e den Spannungsverlust im Anker und den abgeschätzten Betrag des Spannungsverlustes durch Ankerrückwirkung hinzufügt.

Zu diesem Zwecke stellt man folgende Rechnungen an:

Die Länge des auf dem Anker aufgewickelten Drahtes kann vorerst nur schätzungsweise bestimmt werden.

Bei einem Grammering[1]) ist die Länge einer Windung einer innersten Drahtlage ungefähr:

$$2 \cdot \left(l + D - D_1 + \frac{d_1}{2}\right),$$

die Länge einer obersten Windung nahezu:

$$2 \cdot (l + D - D_1 + 0{,}9 \cdot m_2 \cdot d_1),$$

folglich die mittlere Länge einer Ankerwindung:

$$2 \cdot \left(l + D - D_1 + d_1 \cdot \frac{\frac{1}{2} + 0{,}9\, m_2}{2}\right)$$

und hiernach die Länge L des auf dem Anker aufgewickelten Drahtes

$$L = m_1 \cdot m_2 \cdot 2 \cdot \left(l + D - D_1 + d_1 \frac{\frac{1}{2} + 0{,}9\, m_2}{2}\right) \quad . \; . \; 18)$$

Bei einem Trommelanker ist die innerste Windung $2l + 2D + 2d_1$ lang; die Länge einer äussersten Windung beträgt

$$2l + 2D + 2 \cdot 0{,}9\, m_2\, d_1.$$

Hiernach ist:

$$L = 2 m_1 \cdot m_2 \left(l + D + d_1 \frac{1 + 0{,}9\, m_2}{2}\right) \quad . \; . \; . \; 19)$$

Allerdings liegen die beiden Hälften einer Windung eines Trommelankers vielfach nicht diametral gegenüber, sind also mit zu grosser Länge hier eingestellt; da aber die Drähte neben der Achse vorbeigeführt werden und sich an Stirn- und Rückseite Wülste bilden, nicht selten auch Isolationsmaterial zwischen die Lagen gewickelt wird, so wird dadurch dieser Längenunterschied mehr als aufgewogen. Selbstverständlich bleiben alle solche Rechnungen nur ganz rohe Annäherungen.

Aus der Länge L des auf den Anker gewickelten Drahtes berechnet man seinen Widerstand

$$\mathfrak{w} = \frac{k_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \cdot L \cdot 4}{d^2 \cdot \pi} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 20)$$

[1]) d_1 ist die Drahtdicke samt Umspinnung.

Dann ist der Ankerwiderstand w_a

$$w_a = \frac{\mathfrak{w}}{4\,p^2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \; 21)$$

und der Spannungsverlust im Anker durch Stromwärme

$$E - e = \frac{i_a \cdot k_0\,(1 + \alpha \cdot t) \cdot L}{a^2 \cdot d^2 \cdot \pi} \quad \ldots \ldots \; 22)$$

(a die Zahl der Paare von Bürstengruppen, d Dicke des nackten Ankerdrahtes, t die für zulässig erachtete höchste Temperatur des Ankers, etwa 60° C.)

Diese Grösse fügt man dann zur Klemmenspannung e hinzu, ebenso den geschätzten Spannungsverlust durch Ankerrückwirkung, um die E M K, die wir mit E bezeichnet haben, zu erhalten.

Für Hauptstrommaschinen und gemischte Maschinen muss noch ein weiterer Betrag für den Spannungsverlust in der vom Hauptstrom durchflossenen Wickelung der Feldmagnete hinzugefügt werden. Die Grösse dieses Betrages setzt man zunächst nur schätzungsweise ein. Nunmehr setzen wir die Ausdrücke[1]

$$m_1 = \frac{D \cdot \pi}{d_1},\; m = m_1 \cdot m_2 = \frac{m_2 \cdot D \cdot \pi}{d_1} \quad \ldots \; 23)$$

$$\Phi = \mathfrak{B}_3 \cdot Q_3 = \mathfrak{B}_3 \cdot D^2 \cdot \varkappa \cdot \lambda \cdot (1 - \mu)$$

in die Gleichung

$$E = \frac{m \cdot \Phi \cdot u \cdot p}{60 \cdot 10^8 \cdot a} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \; 24)$$

ein, so ergiebt sich:

$$E = \frac{m_2 \cdot D \cdot \pi}{d_1} \cdot \frac{\mathfrak{B}_3 \cdot D^2 \cdot \varkappa \cdot \lambda \cdot (1 - \mu) \cdot u \cdot p}{60 \cdot 10^8 \cdot a}$$

Man berechnet daraus den Ankerdurchmesser D:

$$D = \sqrt[3]{\frac{E \cdot 60 \cdot 10^8 \cdot d_1 \cdot a}{\mathfrak{B}_3 \cdot \varkappa \cdot \lambda \cdot (1 - \mu) \cdot \pi \cdot m_2 \cdot u \cdot p}} \quad \ldots \; 25)$$

Fischer-Hinnen giebt in seinem wiederholt erwähnten Werke[2] die Formel:

$$D = \sqrt{\frac{E \cdot a \cdot h' \cdot 120 \cdot 10^8}{u \cdot m \cdot \beta \cdot l \cdot \pi^2 \cdot \mathfrak{B}_3}} \quad \ldots \ldots \; 26)$$

Hierin ist l die Länge des Ankers, h′ wird definiert durch die Gleichung:

$$m = \frac{D \cdot \pi}{h'} \cdot m' \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \; 27)$$

wenn m′ die auf die Länge h′ (z. B. Breite einer Nute und eines Zahnes) entfallende Anzahl von Drähten ist.

[1] d_1 ist die Dicke des isolierten Drahtes.
[2] Fischer-Hinnen, Gleichstrommaschinen, 4. Aufl., S. 75.

Die Grösse β bedeutet den Winkel, unter dem der Polarschuh von der Mitte des Ankers aus erscheint.

Aus dem Durchmesser können dann alle anderen auf den Anker bezüglichen Grössen ermittelt werden.

Die Grösse des inneren Ankerdurchmessers wird bei Trommelankern aus dem Betrage der zulässigen Sättigung des Ankereisens ermittelt.

Bei Ringankern muss vor allen Dingen auch darauf Rücksicht genommen werden, dass die Drähte auf der Innenfläche des Ringes bequem untergebracht werden können. Kleine Maschinen mit Ringankern müssen deshalb, wie schon früher erwähnt wurde, einen verhältnismässig grossen Ankerdurchmesser erhalten.

6. Anhalte für die Wahl der Abmessungen neu zu konstruierender Maschinen.

Bei der Mannigfaltigkeit der Konstruktionen erstklassiger Dynamomaschinen lassen sich allgemeine Regeln über die Wahl der Abmessungen gar nicht geben. Die aufgestellten Regeln passen, vorsichtig angewendet, leidlich für Maschinen mittlerer Verhältnisse. Die Resultate, die sie ergeben, bedürfen aber der gewissenhaften Nachprüfung und häufig erheblicher Abänderungen, wenn man sie auf kleine Maschinen oder aussergewönliche Umlaufszahlen anwenden will. Ein häufig benutzter Anhalt ist der, dass man für die Wahl der Abmessungen eine Maschine gleicher Konstruktion zu Grunde legt, die für eine andere, bekannte Leistung bestimmt ist. Nach Arnoux kann man, wenn i und i' die Stromstärken, E und E' die Klemmenspannungen, w_a und w_a' die Ankerwiderstände, m und m' die Ankerwindungszahlen, d und d' die Drahtdurchmesser und l und l' die Längen bei zwei Maschinen verschiedener Grössen sind, näherungsweise die Beziehung aufstellen:

$$\frac{i}{i'} = \frac{E'}{E} = \frac{\sqrt{w_a'}}{\sqrt{w_a}} = \frac{m'}{m} = \frac{l'}{l} = \frac{d^2}{d'^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 28)$$

Die Längsabmessungen der Maschinen lassen sich kaum in allgemein gültiger Weise in Beziehung zum Verhältnis der Leistungen bringen, da die Teile des Volumens, die von den nötigen Isolationen ausgefüllt werden, mit wachsender Grösse einen immer kleineren Bruchteil des Gesamtvolumens einnehmen.

Kapp hat auf dem Wege des Versuches ermittelt, dass die zulässige Leistung von verschiedenen Maschinen gleicher Type ungefähr einer Potenz mit dem Exponenten 3,3 bis 3,9 der linearen Abmessungen proportional sind.

E. Schulz dagegen giebt an, dass für zwei gleichartige Maschinen vieler gangbarer Konstruktionen die Ankerdurchmesser D′ und D sich etwa wie die 2,6te Wurzel des Quotienten der Leistungen L und L′ verhalten

$$\frac{D'}{D} = \left(\frac{\mathfrak{L}'}{\mathfrak{L}}\right)^{\frac{1}{2,6}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 29)$$

Die Erfahrungswerte für erprobte, neuere Maschinen liegen etwa zwischen folgenden Grenzwerten, die zu überschreiten man sich hüten wird.

Kraftliniendichte im Ankereisen bei Trommelankern	10000 bis 14000 Linien für 1 *qcm*
Kraftliniendichte im Ankereisen bei Ringankern	12000 » 16000 » » 1 »
Kraftliniendichte in den Feldmagneten bei Gusseisen	6000 » 8000 » » 1 »
Kraftliniendichte in den Feldmagneten bei Stahlguss	10000 » 14000 » » 1 »
Kraftliniendichte im Polschuh	7000 » » 1 »
Kraftliniendichte am Fusse der Zähne nicht über	16000 » 19000 » » 1 »
Verhältnis des Querschnittes des Ankereisens zum Querschnitt der Feldmagnete (bei Stahlguss) für Trommelanker	1,1 bis 0,8
Verhältnis des Querschnittes des Ankereisens zum Querschnitt der Feldmagnete (bei Stahlguss) für Ringanker	0,5 » 0,6
Verhältnis der wegen der Ankerrückwirkung hinzuzufügenden Ampèrewindungen der Feldmagnete für Trommelanker	1/5 » 1/8
Verhältnis der wegen der Ankerrückwirkung hinzuzufügenden Ampèrewindungen der Feldmagnete für Ringanker	1/3 » 1/4
Umfangsgeschwindigkeit der Anker für längliche Anker	12 bis 18 *m*/Sek
Umfangsgeschwindigkeit der Anker für abgeplattete Anker	25 » 30 »
Querschnittsbelastung der Ankerdrähte	2 » 4 Ampère für 1 *qcm*
Abkühlungsoberfläche des Ankers für jedes in Wärme umsetzte Watt (Stromwärme und Wärme durch Foucaultströme u. durch Hysteresis)	10 » 5 *qcm*
Querschnittsbelastung in den Wickelungen der Feldmagnete	0,75 » 2,5 Amp. für 1 *qmm*
Abkühlungsoberfläche der Feldmagnetwickelung für jedes Watt	20 » 10 *qcm*.

Erhält man bei dem Entwurfe einer Maschine Verhältnisse, die die hier angegebenen Grenzen überschreiten, so hat man unzweckmässige Annahmen gemacht und muss die Anordnung abändern.

Die Zahl der Ampèrewindungen für 1 *cm* Ankerumfang schwankt zwischen 80 bis 100 für kleinere Maschinen und zwischen 120 bis 150 für grössere Maschinen.

Damit eine Maschine eine genügende Stetigkeit bei Schwankungen der Umlaufszahl und der Belastung aufweist, hat es sich erfahrungsmässig als ratsam erwiesen, den Luftzwischenraum so zu wählen, dass die Ampèrewindungen, die zur Überwindung des magnetischen Widerstandes des Luftraumes nötig sind, höchstens gleich, besser aber niedriger an Zahl sind, als die Ampèrewindungen, die zur Überwindung der magnetischen Widerstände des im Eisen verlaufenden Teiles des Kraftlinienweges sind.

Die Anzahl der Ampèrewindungen der Feldmagnete wird meist zwei- bis viermal die Zahl der Ampèrewindungen des Ankers ausmachen.

Bei Nutenankern hängt die Grösse des Luftzwischenraumes δ von Gestalt, Anzahl und Grösse der Zähne und ausserdem von der magnetischen Sättigung im Ankereisen ab. Man macht die Nutentiefe t ungefähr höchstens gleich ein Zehntel des Ankerdurchmessers, $t = 0{,}1 \cdot D$, die Nutenbreite s etwa gleich der Hälfte des Umfanges der Bohrung der Feldmagnete, dividiert durch die Zahnzahl, $s = 0{,}5 \cdot u_1$. Den Luftabstand δ wählt man bei Nutenankern nicht unter 0,5 s bis 0,6 s. Damit ein funkenfreier Gang überhaupt möglich ist, darf der Magnetismus an der anlaufenden Polecke bei Stromerzeugungen (an der ablaufenden Polecke bei Motoren) nicht Null werden, oder gar umgekehrt werden, dies wird nach Fischer-Hinnen[1]) erreicht (vergl. Kap. XX, Abschn. 8, S. 415), wenn:

$$m < 6{,}37 \cdot \frac{\mathfrak{B} \cdot \delta \cdot p \cdot a}{i \cdot \beta} > \frac{D \cdot \pi \cdot m'}{h'} \quad . \; . \; . \; . \; 30)$$

Hierin ist δ die Dicke des Luftzwischenraumes zwischen Ankereisen und Polschuh, $\mathfrak{B}$ die Kraftliniendichte, herrührend von den Feldmagneten, β der Winkel, den der Polbogen umfasst. Die Bedeutung der übrigen Grössen ist am Ende des Abschnittes 4 angegeben.

7. Zahlenbeispiel für die Berechnung eines Gleichstromankers.

Es sei bei einer zweipoligen Maschine des sogenannten Manchestertypus mit Ringanker, ohne Nuten:[2])

$i_a = 150$ Ampère, $e = 65$ Volt, $u = 1100$ Umläufe in der Minute.

[1]) Fischer-Hinnen, Die Wirkungsweise etc. elektrischer Gleichstrommaschinen. 4. Aufl. S. 74.

[2]) Dieses Beispiel soll lediglich zur Erläuterung des Ganges der Rechnung für einen glatten Anker dienen. Jetzt würde man eine solche Maschine jedenfalls mit Nutenanker ausstatten. Maschinen dieser Art sind zuerst von Brown

a) Vorläufige Rechnung.

Als zulässige Belastung für 1 *qmm* Kupferquerschnitt des Ankerdrahtes wählen wir B = 4,15 A. Dann ist nach Gleich. 3):

$$q = \frac{150}{2 \cdot 4,15} = 18,07 \; qmm.$$

Daraus ergiebt sich nach Gleich. 2) die Dicke des nackten Drahtes:

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot 150}{\pi \cdot 4,15 \cdot 1}} = 4,8 \; mm.$$

Nunmehr ist $d_1 = d + 0,5 = 5,3 \; mm = 0,53 \; cm$.

Nach der empirischen Formel 4), in der man für $E = 65 + 10 = 75$ Volt und für $\lambda = \frac{2}{3}$ einsetzt, wird:

$$D = 13 \sqrt[3]{\frac{75 \cdot 150}{\frac{2}{3} \cdot 1100}} = 32,3 \; cm, \quad l = \frac{32,3 \cdot 2}{3} = 21,5 \; cm.$$

Zur Bestimmung der Zahl der Windungen benutzt man Gleich. 23). Um sicher zu sein, dass die Drähte auf dem Anker Platz finden, wählt man für d_1 statt 0,53 den Wert 0,54 und findet:

$$m_1 = \frac{32,3 \cdot \pi}{0,54} = 188.$$

Um bequeme Zahlen zu erhalten, wählt man:

$$m_2 = 1.$$

Nach Gleich. 16) wird jetzt der Eisenquerschnitt des Ankers bestimmt. Wir nehmen $\varkappa = 0,85$ und $D_1 = 0,6 \; D$, folglich:

$$\mu = \frac{D_1}{D} = 0,6.$$

Es wird:

$$Q_a = 32,3^2 \cdot 0,85 \; (1 - 0,6) \cdot \frac{2}{3} = 236 \; qcm$$

und nach Gleich. 17):

$$\mathfrak{B}_a = \frac{75 \cdot 60 \cdot 10^8}{188 \cdot 1100 \cdot 1 \cdot 236} = 9220 \text{ Kraftlinien.}$$

Eine so geringe Sättigung des Ankereisens ist nicht zweckmässig, da dann die Rückwirkung des Ankers zu gross wird.

Es hat sich durch die praktische Erfahrung als ratsam erwiesen, die Sättigung $\mathfrak{B}_a$ der aus Schmiedeeisen hergestellten Anker zwischen 12000 und 16000 zu wählen.[1])

---

gebaut worden. Seit Einführung des Stahlgusses ist dieser früher sehr verbreitete Maschinentypus für grössere Leistungen seltener geworden.

[1]) Neuerdings gilt als Regel, dass man die Kraftliniendichte im Ankereisen bei hohen Umlaufszahlen, zumal aber bei mehrpoligen Maschinen, mit Rücksicht auf die Grösse der Hysteresisverluste, höchstens etwa zu 12000 wählt.

Wir wollen deshalb den Ankerquerschnitt um soviel verkleinern, dass wir ungefähr auf eine mittlere Sättigung, nämlich 14000 Kraftlinien für jeden Quadratcentimeter Fläche des Querschnittes, kommen.

Wir verringern demnach den Querschnitt im Verhältnisse:

$$Q_a : 236 = 9220 : 14000$$

und finden

$$Q_a = 155.$$

Dann ergiebt sich aus Gleich. 16):

$$D = \sqrt{\frac{Q_a}{\varkappa \cdot \lambda \cdot (1 - \mu)}} = \sqrt{\frac{155}{0{,}85 \cdot \frac{2}{3} \cdot (1 - 0{,}6)}} = 26{,}2\ cm.$$

Demnach:

$$l = \tfrac{2}{3} \cdot 26{,}2 = 17{,}5\ cm$$

und

$$m_1 = \frac{(D + \frac{1}{2} d_1) \cdot \pi}{d_1} = \frac{(26{,}2 + 0{,}27) \cdot \pi}{0{,}53} = 157 \text{ Windungen.}$$

Da dies keine bequeme Zahl ist, wählen wir: $m_1 = 160$. Dann müssen wir auch für D einen etwas grösseren Wert annehmen, damit die Windungen Platz finden, setzen also zunächst:

$$D = 26{,}5\ cm,\quad D_1 = 15{,}9,\quad l = 17{,}7.$$

Daraus ergiebt sich näherungsweise die Länge L des auf den Anker aufgewickelten Drahtes:

$$L = m_1 \cdot 2 \cdot (l + D - D_1 + d_1) =$$
$$= 160 \cdot 2\ (17{,}7 + 26{,}5 - 15{,}9 + 0{,}5) = 9216\ cm = 92\ m.$$

Daraus findet man den Widerstand $\mathfrak{w}$ des auf den Anker aufgewickelten Drahtes (vergl. Kap. I, Abschn. 12, S. 10):

$$\mathfrak{w} = \frac{0{,}016\ (1 + 0{,}0038 \cdot 60) \cdot 92}{18{,}1} = 0{,}1\ \omega.$$

Der Ankerwiderstand w_a ist nach Gleich. 3):

$$w_a = 0{,}025\ \omega.$$

Der Spannungsverlust im Anker:

$$E - e = 0{,}025 \cdot 150 = 3{,}75 \text{ Volt.}$$

Einen etwa gleichen Spannungsverlust wird man in der vom Hauptstrom durchflossenen Wickelung der Maschine zulassen, etwa 3,25 Volt.

Da e = 65 ist, wird man hiernach:[1])

$$E = 65 + 3{,}75 + 3{,}25 + 4 = 76 \text{ Volt}$$

annehmen.

[1]) Die zusätzlichen 4 Volt sind für Ankerrückwirkung angesetzt. Die Ankerrückwirkung ist niedrig veranschlagt, weil der Luftzwischenraum zwischen Ankereisen und Polschuh bei glatten Ankern sehr gross ausfällt.

b) Definitive Rechnung.

Nunmehr berechnet man den genauen Wert von D nach Gleich. 25) unter Einsetzung der gewonnenen Zahlgrössen:

$$D = \sqrt[3]{\frac{76 \cdot 60 \cdot 10^8 \cdot 0{,}53}{14000 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}667 \cdot (1 - 0{,}6)\,\pi \cdot 1 \cdot 1100 \cdot 1}} = 28\ cm.$$

Demnach ist $D_1 = 28 \cdot 0{,}6 = 16{,}8\ cm$, $l = 28 \cdot \frac{2}{3} = 19\ cm$.

Nunmehr bestimmt man den Ankerquerschnitt genauer nach Gleich. 16):

$$Q_a = 28^2 \cdot 0{,}85 \cdot (1 - 0{,}6) \cdot \frac{2}{3} = 176\ qcm.$$

Da die Sättigung des Ankereisens hiernach zu 13700 Linien angenommen werden muss, finden wir die Feldstärke:

$$\Phi = \mathfrak{B}_a \cdot Q_a = 13700 \cdot 176 = 2410000 \text{ Linien}$$

und daraus mit Hilfe der Gleich. 23):

$$m = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{\Phi \cdot u \cdot p},$$

die genaue Windungszahl zu:

$$m = \frac{76 \cdot 60 \cdot 10^8}{2410000 \cdot 1100 \cdot 1} = 170.$$

Es soll m eine bequeme gerade Zahl sein; wir wählen, mit Rücksicht auf den weiterhin ermittelten Wert von m_3, $m = 174$.

Nunmehr bestimmen wir die Zahl der Kollektorlamellen nach Gleich. 14):

$$m_3 = 0{,}04 \cdot 174 \cdot \sqrt{75} = 60,$$

nehmen also, da $58 \cdot 3 = 174$ ist, 58 Kollektorlamellen an.

Zur Kontrolle ermitteln wir noch die abkühlende Oberfläche des Ankers O:

$$O = D \cdot \pi \cdot l + 2\pi D \cdot (D - D_1) = 3641\ qcm.$$

Es werden nun in dem Drahte $i_a{}^2 \cdot w_a$ Watt in Wärme umgesetzt, das sind 562 Watt. Die abkühlende Oberfläche für 1 Watt in Wärme umgesetzte elektrische Energie beträgt somit $\frac{3641}{562}$, nahezu 6,5 *qcm*. Die abkühlende Oberfläche ist somit nur knapp ausreichend.

Um für die Folge die äussere Dicke des Ankers zu haben, nehmen wir an, die Isolation, die sich zwischen Ankerwickelung und Ankereisen befindet, sei 0,7 *mm* dick. Darauf kommt der Draht, eine Lage, mit 5,3 *mm* und die zur Befestigung der Drähte dienenden Bandagen mit 1,5 *mm*.

Den äusseren Durchmesser des gewickelten Ankers nehmen wir danach zu:

$$28 + 2 \cdot 0{,}53 + 2 \cdot 0{,}07 + 2 \cdot 0{,}15 = 29{,}5 \; cm$$

an.

Setzen wir einen Spielraum von 4,5 *mm* zwischen äusserer Ankeroberfläche und Polschuh voraus, so muss die Ausbohrung des Polschuhes mit 30,4 *cm* Durchmesser erfolgen. Als Zwischenraum zwischen Anker- und Schenkeleisen ergiebt sich somit $\delta = 1{,}2 \; cm$.





XXII. Kapitel.

Die Berechnung der Feldmagnete.

1. Schädliche und nützliche Streuung.

Von den in den Elektromagnetspulen erzeugten Kraftlinien schliesst sich ein erheblicher Teil, ohne zur Induktionswirkung beizutragen. Darin besteht die schädliche Streuung einer Dynamomaschine. Anderseits schliessen sich aber auch eine Anzahl Kraftlinien, die ausserhalb der Polflächen der Elektromagnete ausgetreten sind, oder sich seitlich über die Begrenzung der Polflächen hinaus ausgedehnt haben, noch durch das Ankereisen und wirken vermehrend auf die Induktion in der Wickelung ein; dies ist die nützliche Streuung.

Über den Betrag der schädlichen Streuung sind Rechnungen und Versuche angestellt worden. Die Rechnungen beruhen meist auf mehr oder minder unsicheren Grundlagen. Von besonderem Werte ist daher nachstehende von Wiener herrührende Tabelle der Koëffizienten, mit der die erforderliche Kraftlinienzahl multipliziert werden muss, wenn man die Anzahl der Ampèrewindungen der Feldmagnete berechnen will.

Streuungskoëffizienten ε für Maschinen mit glattem Anker.

Leistung der Maschine in Kilowatt	Name der Maschinentype					
	Zweipolige Hufeisen	Zweipolige Lahmeyer	Manchester-type	Vierpolige Stahlguss	Sechspolige Stahlguss	Innenpolmaschine
0,1	1,75	1,50				
0,5	1,50	1,35	1,90			
1	1,45	1,30	1,75			
5	1,35	1,25	1,60	1,45	1,40	1,35
10	1,28	1,20	1,50	1,32	1,32	1,30
50	1,22	1,15	1,40	1,28	1,25	1,25
100	1,20	1,12	1,35	1,24	1,22	1,22

Bei Nutenankern können die Zahlen um 10% kleiner gewählt werden.

Die nützliche Streuung berücksichtigt man meist nur näherungsweise dadurch, dass man den Querschnitt des Luftraumes zwischen Anker und Pol und die von Kraftlinien getroffene Ankeroberfläche um etwa 2 bis 10% grösser annimmt, als sie wirklich ist.[1])

2. Die Berechnung der Querschnitte.

Ist die Zahl der Kraftlinien bestimmt, die durch den Eisenquerschnitt des Ankers hindurchgehen müssen, so findet man aus den bekannten Streuungsverhältnissen die grössere Zahl von Kraftlinien $\Phi'_2 = \varepsilon \cdot \Phi_2$, die aus den Polschuhen austreten und in dem Eisenkerne der Feldmagnete erzeugt werden müssen. (Man vergl. Kap. VI, Abschn. 7, S. 134.) Die Methoden zur Bestimmung dieses Streuungsverhältnisses sind früher (Kap. XV, Abschn. 13, S. 324) an dem Beispiele einer Lahmeyermaschine erläutert worden.

Man entscheidet sich nun über den Sättigungsgrad $\mathfrak{B}_1$, den man bei stärkster Beanspruchung der Maschine höchstens im Eisen der Elektromagnetkerne zulassen will. Dies ergiebt dann den Querschnitt des Schenkeleisens $q_1 = \frac{\varepsilon \cdot \Phi}{\mathfrak{B}_1}$. Diesen Sättigungsgrad wählt man zwischen 5000 und 6000 Kraftlinien, wenn die Magnetschenkel aus Gusseisen hergestellt sind, zwischen 10000 und 12000, wenn man sie aus Schmiedeeisen, und etwa zu 15000, wenn man sie aus weichem Stahlguss anfertigen will.

Für die Längen der Schenkel richtet man sich nach den Abmessungen der Maschinen gleicher Art und berücksichtigt dabei, dass man die Schenkel so kurz als möglich macht, aber jedenfalls so gross, dass ein genügend grosser Raum für das Unterbringen der Magnetwickelung zur Verfügung steht, und dass die zur Erregung des Magnetfeldes dienenden Spulen eine ausreichend grosse Oberfläche erhalten, um die in dieser Wickelung erzeugte Stromwärme ausstrahlen zu können. Für jedes in Wärme umgesetzte Watt sollen 9 bis 18 *qcm* Oberfläche der Spulen der Feldmagnete vorhanden sein, und die Stromdichte in den Drähten soll nicht mehr als 1,2 bis 2 Amp. für 1 *qmm* Kupferquerschnitt betragen.

Im Polschuh selbst macht man die Kraftliniendichte gern etwas grösser (für Gusseisen z. B. etwa 7000) als in den Magnetschenkeln (etwa 5000), weil die Polstücke doch nur kurz sind, und daher trotz hoher Sättigung nicht zu viel Ampèrewindungen beanspruchen, und weil eine hohe Dichte im Polschuh die Ankerrückwirkung verkleinert.

---

[1]) Eine auf nicht ganz unanfechtbarer Grundlage stehende Formel nebst Tabelle giebt Fischer-Hinnen in seinem mehrfach erwähnten trefflichen Werke: Die Wirkungsweise etc. elektr. Gleichstrommaschinen. 4. Aufl. S. 151.

Der Polquerschnitt muss sich zum Ankerquerschnitt verhalten umgekehrt wie die Kraftliniendichten in diesen beiden Querschnitten, also z. B. wie 12000 : 7000.

Nennt man die Höhe des Polschuhes c, seine Länge (gleich der Ankerlänge) l, so ist der Polschuhquerschnitt $l \cdot c$. Der Ankerquerschnitt ist bei Ankern ohne Nuten $(D - D') \cdot l$, wenn D der äussere, D′ der innere Durchmesser des Ankereisens, l die Ankerlänge ist.

Fig. 286. Bedeutung der Buchstaben b, c, β, m und D.

Man hat also z. B.

$$\frac{c \cdot l}{(D - D') \cdot l} = \frac{\mathfrak{B}_a}{\mathfrak{B}_2} = \frac{12000}{7000}.$$

Hat man es jedoch mit gezahnten Ankern zu thun und ist t die Nutentiefe, so ist der Querschnitt des Ankereisens nur:

$$(D - 2t - D') \cdot l.$$

Aus diesem Ausdruck kann c, die Polschuhhöhe, immer als Bruchteil von D (dem Ankerdurchmesser) gefunden werden.

Der Querschnitt des Luftraumes ist bei Ankern mit glatter Oberfläche nur abhängig von der Grösse des Winkels β (vergl. Fig. 286), unter dem die Kanten des Polschuhes von der Achse des Ankers aus erscheinen. Es ist sichtlich:

$$\sin\frac{\beta}{2} = \frac{c}{m}$$

oder

$$\beta = 2 \cdot \text{arc} \sin \frac{c}{m} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

Der Querschnitt des Luftraumes ist alsdann der Teil der Ankeroberfläche, der von diesem Winkel eingeschlossen wird, also:

$$Q_1 = K' \cdot D \cdot \pi \cdot \frac{\beta}{360} \cdot l. \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

K′ ist ein Koëffizient, der von dem Betrage der nützlichen Streuung abhängt.

Man findet bei guten Maschinen zumeist für Nutenanker mit gutem, praktischem Erfolg angewendet:

für zweipolige Maschinen β zwischen 110° und 130° und ungefähr $c = 0{,}85 D$

» vier »	»	$\beta = 60^0$	. . . .	»	$c = 0{,}5 D$
» sechs »	»	$\beta = 40^0$	. . . .	»	$c = 0{,}34 D$
» acht »	»	$\beta = 30^0$	. . . .	»	$c = 0{,}26 D$
» zwölf »	»	$\beta = 20^0$	. . . .	»	$c = 0{,}17 D$

3. Die magnetischen Verhältnisse bei Nutenankern.

Bezeichnen wir die Kraftliniendichte an der Fläche des Polschuhes mit $\mathfrak{B}_p$, die Kraftliniendichte an der äusseren Zahnoberfläche mit $\mathfrak{B}_z$, mit s die Nutenbreite, mit z' die Zahnbreite oben, mit z'' die Zahnbreite unten und, wie bisher, mit D den Ankerdurchmesser, die Nutenzahl mit v, so ist:

$$(s + z') \cdot v = D \cdot \pi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Ferner verhält sich:

$$\frac{\mathfrak{B}_p}{\mathfrak{B}_z} = \frac{z'}{u'} \text{ näherungsweise } \frac{\mathfrak{B}_p}{\mathfrak{B}_z} = \frac{z'}{z'+s} \quad . \quad . \quad 4)$$

folglich ist die magnetische Sättigung an der Oberfläche der Zähne $\mathfrak{B}_z$

$$\mathfrak{B}_z = \mathfrak{B}_p \cdot \frac{z'+s}{z'} \cdot \frac{m}{D} \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

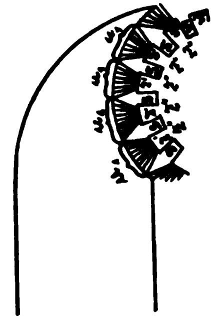


Fig. 287. Erläuterung der gebrauchten Bezeichnungen.

Die mittlere Sättigung im Luftzwischenraume $\mathfrak{B}$ ist:

$$\mathfrak{B}_l = \frac{\mathfrak{B}_p + \mathfrak{B}_z}{2} = \frac{\mathfrak{B}_p}{2} \cdot \left\{1 + \frac{z'+s}{z'} \cdot \frac{m}{D}\right\} =$$

$$= \frac{\mathfrak{B}_p}{2} \cdot \left\{\frac{z' \cdot (D + m) + s \cdot m}{z' \cdot D}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Da die Zähne, auch wenn man die einfachste Zahnform annimmt, bei der die Nuten seitlich durch die Radien begrenzt sind, sich nach der Achse des Ankers zu verengen, ist die magnetische Sättigung am Zahnfusse z'' wesentlich grösser.

Wählt man die Zahntiefe $t = k \cdot D$, so verhält sich:

$$\frac{z'}{z''} = \frac{\frac{D}{2}}{\frac{D}{2} - t}$$

und demnach ist:

$$z'' = z' \cdot (1 - 2k) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

Die magnetische Sättigung am Zahnfusse $\mathfrak{B}_f$ verhält sich zu der an der Zahnoberfläche $\mathfrak{B}_z$

$$\mathfrak{B}_f : \mathfrak{B}_z = z' : z'',$$

folglich ist:

$$\mathfrak{B}_f = \frac{\mathfrak{B}_z \cdot z'}{z''} = \mathfrak{B}_z : (1 - 2k) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Man lässt nun zwar in den Zähnen eine wesentlich grössere Sättigung zu, als im Ankereisen, geht aber trotzdem nicht gern über etwa 16000 bis 19000 Kraftlinien hinaus.

Fischer-Hinnen bestimmt bei Nutenankern den magnetischen Widerstand des Luftraumes $2\delta \cdot \mathfrak{B}_l'$ dadurch, dass er für δ den wirklichen Abstand zwischen Zahnoberfläche und Bohrung der Polschuhe einsetzt. Die Sättigung $\mathfrak{B}_l'$ aber ermittelt er, indem er $\frac{\varepsilon \cdot \Phi}{b \cdot l} = \mathfrak{B}_z$ mit einem Faktor K' multipliziert

$$\mathfrak{B}_l' = K' \cdot \mathfrak{B}_l \quad \ldots \ldots \ldots \quad 9)$$

den er der folgenden Tabelle entnimmt. Für halbgeschlossene Nuten wird $\mathfrak{B}_l'$ um 15 bis 20% grösser angenommen.

Werte von K'.

Nutenöffnung s in *cm*	Luftabstand δ in *cm*				
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
0,4	1,3	1,27	1,24	1,2	—
0,6	1,34	1,31	1,27	1,25	1,2
0,8	—	1,37	1,34	1,30	1,23
1,0	—	—	1,36	1,32	1,24
1,2	—	—	—	1,35	1,26

Wegen der nützlichen Streuung der Kraftlinien bedarf diese Grösse noch der Multiplikation mit einem zweiten Koëffizienten K, dessen Wert

$$K = \frac{1}{1 + K' \cdot \frac{x}{b}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 10)$$

ist, wenn man abkürzungsweise $x = 4{,}6 \cdot \frac{\delta}{\xi} \cdot \log\left(\frac{\xi \cdot c}{\delta} + 1\right)$ setzt.

Hierin ist:

$$c = \frac{1}{2}\left\{\frac{D \cdot \pi}{2p} - b\right\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11)$$

Wenn α die Grösse des Winkels bezeichnet, den die Polflächen mit der Armatur einnehmen, ist:

für $\alpha =$	90^0	120^0	150^0	180^0
» $\xi =$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{5}{6}\pi$	π

Zur Erleichterung der Rechnung hat Fischer-Hinnen eine Tabelle entwickelt, die er auf S. 399 der IV. Auflage seines Werkes mitteilt.

Manche Konstrukteure berechnen auch den magnetischen Widerstand der Zähne samt Nuten gesondert und fügen diese Grösse als besonderen Summanden in die Formel 12) ein. (Vergl. z. B. das im nächsten Kapitel mitgeteilte, von van der Hecht herrührende Beispiel.)

4. Die Ermittelung der Bewickelung.

Um die Anzahl der Ampèrewindungen, die zur Erzeugung des Feldes nötig sind, zu ermitteln, skizziert man unter genauer Innehaltung der Massverhältnisse das Eisengestell der Maschine in beliebigem Massstabe ($^1/_5$ bis $^1/_{10}$) und entnimmt dieser Zeichnung die in den geometrischen Achsen der einzelnen Eisenteile gemessenen mittleren Längen der Kraftlinien. (Vergl. Kap. VI, Abschn. 7, S. 135, Formel 16.) Zur Bestimmung der Anzahl der Ampèrewindungen benutzt man dann die Hopkinson'sche Formel:

$$n\,i = \{l_1 \cdot f(\varepsilon_1\,\mathfrak{B}_1) + 2\,K \cdot l_2\,\mathfrak{B}_2 + l_3 \cdot f(\varepsilon_3\,\mathfrak{B}_3) + l_4 \cdot f(\varepsilon_4\,\mathfrak{B}_4)\} \cdot \frac{10}{4\pi} \qquad 12)$$

Die Grösse $f(\varepsilon\,\mathfrak{B})$ entnimmt man Kurven ähnlich den in Fig. 58, S. 136 mitgeteilten, die man durch Versuche für die zu verwendenden Eisensorten vorher selbst festgestellt hat.

Die mittlere Weglänge der Kraftlinien kann selbstverständlich immer nur mit einer ziemlich rohen Annäherung ermittelt werden. Für Maschinen, deren magnetischer Stromkreis dem eines einfachen Hufeisenmagneten entspricht, ergiebt sich dieser mittlere Kraftlinienweg ohne weiteres. (Man vergl. das Beispiel in Kap. VI, Abschn. 7, S. 136.) Die Gesamtzahl n der Windungen wird in diesem Falle in zwei Hälften auf die beiden Schenkel verteilt.

Bei den zweipoligen Maschinen des sogenannten Manchestertypus (vergl. Fig. 289) sind zwei getrennte magnetische Stromkreise vorhanden. Man muss alsdann in jedem derselben die Hälfte der im ganzen erforderlichen Kraftlinienzahl erzeugen und darf auch nur die halbe Oberfläche und nur den halben Eisenquerschnitt des Ankers für die Ermittelung der Anzahl der Ampèrewindungen in Ansatz bringen.

Will man für eine Maschine des Lahmeyertypus und der zahlreichen verwandten Modelle (vergl. Fig. 297) die Rechnung durchführen, so muss man für den magnetischen Widerstand des Joches den beiderseitigen Eisenquerschnitt in Rechnung stellen. Die beiden parallelen Zweige des Eisengestelles erhalten dann jeder einen halb so grossen Querschnitt, als man ihn den Schenkeln eines Hufeisenmagneten geben würde. Jede der beiden vorhandenen Spulen erhält dann die Hälfte der berechneten Ampèrewindungen. Bei mehrpoligen Maschinen mit Aussenoder Innenpolen, wie solche in Kap. XXIII beschrieben werden, wirkt jede Spule auf zwei magnetische Stromkreise. Man giebt daher in diesen Fällen jeder Spule nur die halbe Anzahl der berechneten Ampèrewindungen.

5. Der Ausgleich der Gegenwindungen des Ankers.

Die Ankerrückwirkung (vergl. Kap. XX, Abschn. 8, S. 412) lässt einen Teil der Ampèrewindungen der Feldbewickelung nicht zur Geltung kommen. Um diese Wirkung auszugleichen, muss die Zahl der Ampèrewindungen der Feldmagnete um einen entsprechenden Betrag vergrössert werden.

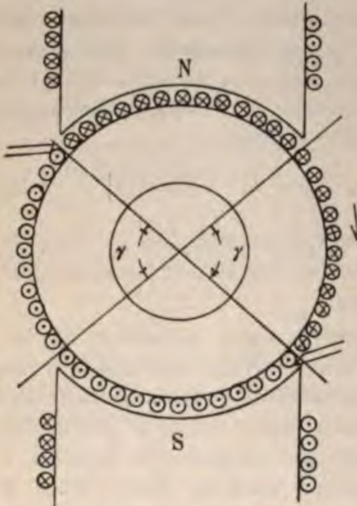


Fig. 288. Definition des Winkels γ, den die Gegenwindungen umfassen.

In nebenstehender Fig. 288 sind die als Gegenwindungen auftretenden Ampèrewindungen der Feldmagnete diejenigen, die zwischen den Schenkeln der Winkel γ liegen. Ihr Betrag ist:

$$\frac{2\gamma}{360} \cdot \frac{m}{2} \cdot \frac{i_a}{2},$$

denn es bilden bei der Trommelwickelung je zwei Umfangsdrähte eine Windung, und die in jedem Drahte des zweipoligen Ankers fliessende Stromstärke hat die Grösse

$$\frac{1}{2}\, i_a.$$

Da aber wegen der schädlichen Streuung nicht alle in den Feldmagneten erzeugten Kraftlinien wirklich in den Anker eintreten, muss dieser Betrag noch mit dem Streuungskoëffizienten ε multipliziert werden.

Bei mehrpoligen Maschinen mit 2a Stromkreisen im Anker ist die Stromstärke in den Ankerdrähten aber nicht $\frac{i_a}{2}$, sondern $\frac{i_a}{2a}$.

Beim Ringe ist nun zwar die Zahl der Umfangsdrähte gleich der Anzahl der Ankerwindungen, aber die Gegenwindungen des Ankers wirken dafür in jeder Ringhälfte auch nur auf den halben Kraftlinienstrom. Die Zahl der zum Ausgleich der Gegenwindungen des Ankers nötigen Ampèrewindungen bleibt daher die nämliche, und wir erhalten daher allgemein:

Ampèrewindungen zum Ausgleich der Ankerrückwirkung

$$= \varepsilon \cdot \frac{\gamma \cdot m}{360} \cdot \frac{i_a}{2a} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 13)$$

Besondere Schwierigkeiten bietet die Ermittelung des Winkels γ, da die Anlagestelle der Bürsten im allgemeinen im voraus nicht

bekannt ist. Da sich ohnehin die Ankerrückwirkung nur sehr unsicher vorhersehen lässt, so benutzt man für γ meist den Winkel, den zwei benachbarte Polspitzen von der Mitte des Ankers aus miteinander einschliessen. Nun ist, wenn β den Winkel des Polbogens bedeutet:

$$(\beta + \gamma) \cdot 2p = 360^0,$$

folglich:

$$\gamma = \frac{360}{2p} - \beta \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 14)$$

Etwas genauer findet man den Bürstenverstellungswinkel $\frac{\gamma}{2}$ aus der Näherungsformel:

$$\frac{\gamma}{2} = \arc\sin \frac{m \cdot i_a}{2a \times Aw_f} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 15)$$

wenn man mit Aw_f die Ampèrewindungen der Feldmagnete bezeichnet.

Die Gesamtzahl der Ampèrewindungen der Feldmagnete kann ferner auch durch die Formel bestimmt werden[1]):

$$\text{Korrigierte Ampèrewindungszahl} = \sqrt{Aw_f^2 + \left(\frac{i_a \cdot m}{2a}\right)^2} \quad . \quad 16)$$

Meist giebt die Formel 13) etwas zu kleine und die Formel 16) etwas zu grosse Werte.

Andere Konstrukteure helfen sich dadurch, dass sie von Anfang zu dem Voltverlust im Anker durch Stromwärme $i_a \cdot w_a$ einen gewissen Betrag, etwa das Zwei- bis Fünffache dieses Verlustes, hinzuaddieren und dementsprechend einen dieser höheren Spannung entsprechenden grösseren Kraftlinienstrom in den Feldmagneten ermitteln, der nun wiederum seinerseits eine Vermehrung der Ampèrewindungen der Feldmagnete bedingt.

Schon die Vielheit der von verschiedenen Konstrukteuren eingeschlagenen Wege deutet darauf hin, dass keiner dieser Wege vollständig befriedigt, und dass in der Ermittelung der Bewickelung der Feldmagnete noch bei weitem keine ausreichende Zuverlässigkeit erreicht ist.

6. Zahlenbeispiel für die Berechnung der Feldmagnete einer Manchestermaschine.

Als Beispiel benutzen wir den Fall, für den wir bereits S. 431 die auf den Anker bezüglichen Grössen ermittelt haben, setzen also

[1]) Die Ableitung dieser Formel findet sich z. B. bei E. Schulz, Praktische Dynamokonstruktion, 2. Aufl., S. 37.

die Anordnung der Feldmagnete voraus, wie sie bei den Maschinen des Manchestertypus üblich ist (vergl. Fig. 289). Bei dieser Art Maschinen ist ein doppelter magnetischer Stromkreis vorhanden. Die Berechnung führen wir nur für einen dieser Kreise aus. Jeder derselben besteht aus einem der Magnetschenkel, auf den wir die Wickelung aufbringen wollen, ferner aus den oberen und unteren Hälften der Polschuhe und aus einer Hälfte des Grammeringes. Für den Teil des Eisengestelles, der zur Aufnahme der Windungen dient, setzen wir, der Figur entsprechend, quadratischen Querschnitt und als Material Schmiedeeisen voraus. Die angesetzten Polstücke denken wir uns aus Gusseisen hergestellt.

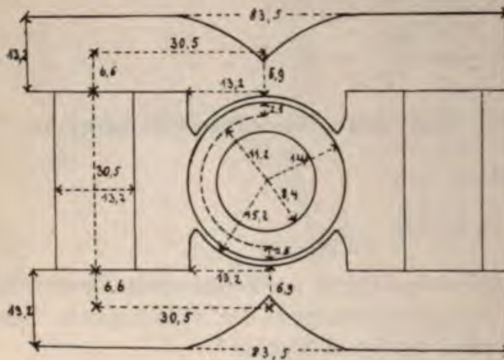


Fig. 289. Massstäbliche Skizze der Eisenteile einer Maschine der Manchestertype.

Der wirksame Kraftlinienstrom in der einen Hälfte des Grammeringes beträgt alsdann: $\Phi = 1{,}2 \cdot 10^6$ Kraftlinien.

Nehmen wir nun an, dass die magnetische Streuung zwischen dem Eisen der Magnetschenkel und dem Ankereisen durch den Koëffizienten $\varepsilon = 1{,}44$ dargestellt werde, so müssen in den Eisenkernen der Elektromagnete

$$\varepsilon \cdot \Phi = 1{,}44 \cdot 1{,}2 \cdot 10^6 = 1{,}73 \cdot 10^6 \text{ Kraftlinien}$$

erzeugt werden. Die gleiche Kraftlinienzahl muss auch die Polstücke durchfliessen.

Soll in den Kernen eine magnetische Sättigung $\mathfrak{B}_1 = 10000$ zugelassen werden, so muss der Querschnitt der Elektromagnetkerne $Q_1 = \frac{\varepsilon \cdot \Phi}{\mathfrak{B}_1} = 173$ *qcm* betragen. Dies ergiebt für die Quadratseite eine Länge von 13,2 *cm*.

Für die gemeinsamen Polstücke soll eine Sättigung von

$$\mathfrak{B}_4 = 6000 \text{ Kraftlinien}$$

zugelassen werden; alsdann wird, wenn man keinen Kraftlinienverlust zwischen dem Elektromagnetkerne und den Polstücken zulässt (was thatsächlich nicht ganz richtig ist), diesen ein Querschnitt:

$$Q_4 = \frac{\varepsilon \cdot \Phi}{\mathfrak{B}_4} = \frac{1730000}{6000} = 289 \; qcm$$

gegeben werden müssen. Wählt man die Breite der gemeinsamen Polstücke wenig grösser als die Länge des Ankers, etwa 22 *cm*, so giebt dies eine Höhe derselben von $\frac{289}{22} = 13{,}2$ *cm*. Die halbe Breite der Polschuhe wählt man gleich der Höhe $= 13{,}2$ *cm*.

Um das Magnetgestell auf dem Fundamente befestigen zu können, wird unten meist eine Auflagerungsplatte mit Öffnungen zum Durchstecken der Fundamentschrauben angegossen, durch welche der Querschnitt etwas verändert wird. Auch die eigentlichen, den Anker teilweise umfassenden Polschuhe werden zumeist etwas eingezogen und abgerundet, sodass sie das Ankereisen an der Seite nur wenig überragen. In der Figur ist diese Abänderung nur teilweise angedeutet; für die Rechnung vernachlässigen wir solche kleine Abweichungen als unwesentlich.

Nunmehr geht man dazu über, das Magnetgestell unter Benutzung der gefundenen Abmessungen in einem beliebigen, aber nicht zu kleinen Massstabe ($^1/_{10}$) zu skizzieren. Man beginnt mit der Aufzeichnung des bereits berechneten Ankers. Einzelne Masse, die nicht durch Rechnung gefunden worden sind, wählt man nach den Grössenverhältnissen bekannter Maschinen gleicher Anordnung, von deren tadelloser Leistung man sich überzeugt hat.

Hierauf wird die Zahl der Ampèrewindungen bestimmt. Die Gleich. 12) nimmt im vorliegenden Falle die Form an:

$$n\,i = \frac{10}{4\pi}\left\{l_1 \cdot f(\varepsilon\mathfrak{B}_1) + l_4 \cdot f(\varepsilon\mathfrak{B}_4) + 2\,K \cdot \mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} \cdot \delta + l_a \cdot f(\mathfrak{B}_a)\right\} \qquad 17)$$

Hierin bezieht sich der Index 1 auf die schmiedeeisernen Kerne der Elektromagnete, der Index 4 auf die gusseisernen Polstücke, der Index $\mathfrak{L}$ auf den Luftzwischenraum und der Index a auf das Ankereisen.

Die Längen l_1, l_3, l_4 entnimmt man der Skizze des Eisengestelles (Fig. 289), danach ist:

$$l_1 = 30{,}5 \qquad l_4 = 2 \cdot 6{,}6 + 2 \cdot 30{,}5 + 2 \cdot 6{,}9 = 88{,}0$$
$$l_3 = \pi \cdot 11 + 2 \cdot 2{,}25 = 39.$$

Die Sättigung im Polschuh ist $\varepsilon \cdot \mathfrak{B}_4 = 6000$.

Der Querschnitt des Ankers sei

$$Q_a = (D - D_1) \cdot l = (28 - 16{,}8) \cdot 19\,176 \; qcm$$

Die Kraftliniendichte im Anker ist nach Voraussetzung 13700.

Der Querschnitt des Luftraumes wird auf folgende Weise ermittelt.

Der Öffnungswinkel β, unter dem der Pol erscheint, wird bestimmt durch die Gleich. 1)

$$\sin\frac{\beta}{2} = \frac{c}{m} = \frac{26{,}4}{30{,}4},$$

da c die Breite des Polschuhes, m den Durchmesser der Bohrung bezeichnet.

Man findet: $\frac{\beta}{2} = 60^0 \qquad \beta = 120^0.$

Hieraus berechnet man den Teil $Q_{\mathfrak{L}}$ der Ankeroberfläche, der von den Schenkeln des Winkels β eingeschlossen wird; dieselbe ist

$$Q_{\mathfrak{L}} = D \cdot \pi \cdot \frac{\beta}{360} \cdot l = 28{,}0 \cdot \pi \cdot \frac{120}{360} \cdot 19 = 550\ qcm.$$

Da die Feldstärke im Gusseisen zu 6000 angenommen war, so beträgt die Liniendichte im Luftzwischenraume:

$$\mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} = \frac{6000 \cdot 502}{550} = 5390.$$

Stellt man die Ergebnisse zusammen, so hat man nunmehr:

Konstruktionsteil	Material	Länge des Kraftlinienweges	Kraftliniendichte	Ampèrewindungszahl f. 1 *cm* [1]	Ampèrewindungen
Anker	Schmiedeeisen	$l_3 = 39$ *cm*	$\mathfrak{B}_3 = 13700$	18	700
Polstücke	Gusseisen	$l_4 = 88$ »	$\mathfrak{B}_4 = 6000$	28	2460
Elektromagnetkerne	Schmiedeeisen	$l_2 = 30{,}5$ »	$\mathfrak{B}_2 = 10000$	6,0	180
Luftzwischenraum	Luft	$2\delta = 2{,}4$ »	$\mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} = 5390$	$5370 \times 0{,}8$	10300

Gesamtzahl der Ampèrewindungen: 13640.

Um die Ankerrückwirkung auszugleichen, erhöhen wir die gefundene Anzahl Ampèrewindungen nach der Formel:

korrigierte Ampèrewindungen =

$$= \sqrt{(i \cdot n)^2 + \left(\frac{i_a \cdot m}{2 \cdot a}\right)^2} = \sqrt{13640^2 + \left(\frac{150 \cdot 174}{2}\right)^2} = 18200.$$

Da wir beabsichtigen eine gemischte Maschine zu konstruieren, die bei verschiedener Belastung konstante Klemmenspannung zeigen soll, so wiederholen wir die Rechnung noch einmal unter der Voraussetzung, dass der Ankerdraht stromlos, eine Ankerrückwirkung nicht vorhanden sei.

Allerdings ist dies nicht ganz richtig, da der Anker doch von dem Strome umflossen wird, der die Magnetisierung der Feldmagnete bewirkt. Erfahrungsmässig übt aber der Fehler, den man auf diese Weise begeht, keinen grossen Einfluss auf das Endresultat aus. Ausserdem kann wegen der unvermeidlichen Verschiedenheiten

[1]) Nach Fig. 58, S. 136.

der Materialien, besonders des Eisens, eine grosse Zuverlässigkeit solcher Rechnungen überhaupt nicht erwartet werden.

Die EMK soll dann 65 Volt betragen, da bei unbelasteter Maschine EMK und Klemmenspannung übereinstimmt. Dann braucht der durch die Feldmagnete im Ankereisen erzeugte Kraftlinienstrom Φ' nicht mehr so gross wie vorher zu sein.

Es wird:

$$\Phi' = \frac{65 \cdot 60 \cdot 10^8}{174 \cdot 1100} = 2{,}04 \cdot 10^6.$$

Der halbe Kraftlinienstrom ist somit $1{,}02 \cdot 10^6$, oder, wenn man das Streuungsverhältnis beibehält, die Kraftlinienzahl in dem Eisengestell $\varepsilon \cdot \Phi' = 1{,}44 \cdot 1{,}08 \cdot 10^6 = 1{,}47 \cdot 10^6$.

Daraus ergeben sich die Sättigungen:

in den schmiedeeisernen Elektromagnetkernen

$$\varepsilon \cdot \mathfrak{B}_1' = \frac{1{,}47 \cdot 10^6}{173} = 8500,$$ giebt 5 Ampèrewindungen für 1 *cm*;

in den gusseisernen Polstücken

$$\varepsilon\ \mathfrak{B}_4' = \frac{1{,}47 \cdot 10^6}{289} = 5100,$$ giebt 21 Ampèrewindungen für 1 *cm*;

im Luftraume

$$\mathfrak{B}_g' = \frac{5100 \cdot 502}{550} = 4650;$$

im Ankereisen

$\mathfrak{B}_a' = 12000$, giebt 10 Ampèrewindungen für 1 *cm*.

Die Längen der Kraftlinien bleiben dieselben wie vorher.

Demnach beträgt die Zahl der erforderlichen Ampèrewindungen:

$$n\,i = 30{,}5 \cdot 5 + 88 \cdot 21 + 2{,}4 \cdot 4650 \cdot 0{,}8 + 39 \cdot 10 = 11400.$$

Bei Vollbelastung mit 150 Amp. sind 18200 Ampèrewindungen erforderlich. Man giebt daher der im Nebenschlusse liegenden Wickelung 11400 und der vom Hauptstrome durchflossenen Wickelung 18200 — 11400 = 6800 Ampèrewindungen. Da die Stromstärke in der vom Hauptstrome durchflossenen Wickelung 150 Amp. beträgt, besteht diese aus: 6800 : 150 = 45 Windungen.

Die Stromdichte in den Drähten der Schenkelwickelung soll zwischen 1,2 und 2 Amp. für je 1 *qmm* liegen. Wählen wir im vorliegenden Falle 1,8, so muss der Querschnitt 150 : 1,8 = 83 *qmm* enthalten. Dies würde eine Drahtdicke von 1,3 *cm* ergeben. Da man solchen Draht nur höchst unbequem wickeln könnte, nimmt man fünf Drähte von 4,6 *mm* Dicke parallel, die zusammen einen Querschnitt von 83,3 *qmm* ergeben. Mit der Isolation ist jeder solcher Draht 4,6 + 0,5 = 5,1 *mm* dick. Fünf Drähte nebeneinander nehmen

2,55 *cm* ein. Man kann somit 30,5 : 2,55 = 12 Windungen des fünffach parallelen Drahtes bequem nebeneinander legen. Ordnet man vier Lagen übereinander an, so erhält man 48 Windungen. In die oberste Lage legt man demnach drei Windungen weniger. Die Dicke dieser Spule wird somit ungefähr: $0,9 \cdot 4 \cdot 0,51 = 1,8$ *cm*.

Die mittlere Länge einer Windung ist $4 \cdot (10,2 + 1,6) = 47,2$ *cm* und die Länge jedes der fünf Drähte somit: $48 \cdot 45 = 2160$ *cm*. Für beide Spulen auf beiden Elektromagnetkernen zusammen macht das 21,6 *m*. Der Widerstand dieses Drahtes von 83 *qmm* Querschnitt ist angenähert:

$$W = \frac{1}{60} \cdot \frac{43,3}{83} = 0,0087 \ \omega.$$

Bei 150 Amp. Belastung giebt dies einen Spannungsverlust von $0,0087 \cdot 150 = 1,3$ Volt [1]) und einen Energieverlust von $0,0087 \cdot 150^2 = 195$ Watt.

Um die im Nebenschlusse liegende Schenkelwickelung zu bestimmen, geht man von der Gleichung aus:

$$i_n = \frac{E'}{w_n}.$$

In derselben ist i_n die Stromstärke im Nebenschlusse, w_n der Widerstand des Nebenschlusses, E' die Bürstenspannung.

Da $w_n = \frac{n \cdot n_1 \cdot l}{50 \cdot q}$ ist, wenn man mit n die Zahl der Windungen, mit n_1 die Zahl der Spulen, mit l die mittlere Länge einer Windung und mit q den Querschnitt in *qmm* bezeichnet, so folgt:

$$q = \frac{i_n \cdot n \cdot n_1 \cdot l}{E' \cdot 50} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad 18)$$

$i_n \cdot n$ ist die Zahl der Ampèrewindungen, $n_1 = 2$, $E' = 65 + 1,3 = 66,3$, l, die mittlere Länge einer Windung, kann nur geschätzt werden; wir setzen $l = 4 \cdot (13,2 + 2 \cdot 3,2 + 3) = 90,4$ *cm* $= 0,9$ *m*. Dann finden wir:

$$q = \frac{11400 \cdot 2 \cdot 0,9}{66,3 \cdot 50} = 6,19 \ qmm \quad d = 2,8 \ mm.$$

Nimmt man nun eine Belastung von 1,2 Amp.[2]) für 1 *qmm* Kupferquerschnitt an, so findet man die Erregerstromstärke zu $6,19 \cdot 1,2 = 7,4$ A und daraus die Windungszahl zu: 11 400 : 7,4 = 1540.

Da der Draht 2,8 *mm* dick ist und die Umspinnung 0,5 *mm* bei dünnen Drähten beträgt, ist die äussere Dicke 3,3 *mm*. In eine

[1]) Statt 3,25 Volt, wie wir angenommen hatten.

[2]) Für die Nebenschlusswickelung wählt man die Belastung B zwischen 1 und 2,5 Amp. für 1 *qmm* Kupferquerschnitt.

Lage gehen somit 30,5 : 0,33 = rund 92 Windungen. Man muss also: 1540 : 92 = 17 Lagen aufbringen. Die Dicke der Nebenschlussspulen wird demnach: 0,9 · 17 · 0,33 = 5,1 *cm*.

Nunmehr bestimmt man die mittlere Länge l einer Windung genauer. Die innere Seite der Spule hat die Länge 13,3 + 2 · 1,8 = 16,6, die äussere Seite hat die Länge 16,6 + 2 · 5,1 = 26,8. Die mittlere Länge einer Seite ist sonach $\frac{16,6 + 26,8}{2} = 21,7$ *cm* und die mittlere Länge einer Windung 4 · 21,7 = 86,8 *cm*.

Der Nebenschlussdraht einer Spule ist somit ungefähr 1337 *m* lang. Beide Nebenschlussspulen zusammen haben eine Länge von 2674 *m*.

Der gesamte Widerstand w_n der im Nebenschlusse liegenden dünndrähtigen Wickelung wird:

$$w_n = \frac{1}{50} \cdot \frac{2674}{6,19} = 8,06\ \omega.$$

Die im Nebenschlusse entwickelte Stromwärme ist:

$$8,06 \cdot 7,4^2 = 441 \text{ Watt.}$$

Im ganzen gehen somit in den Schenkelwickelungen 441 + 195 = 636 Watt verloren.

Die ausstrahlende Oberfläche ist die Mantelfläche zweier quadratischer Prismen von 26,8 *cm* Seite und 30,5 *cm* Höhe, also gleich:

$$2 \cdot 4 \cdot 26,8 \cdot 30,5 = 6460\ qcm.$$

Auf 1 Watt kommen somit:

$$\frac{6460}{636} = 10,1\ qcm,$$

und dies liegt innerhalb der zulässigen Grenzen (9 bis 18 *qcm* für 1 Watt in Wärme umgesetzte elektrische Energie).

Damit ist die Berechnung der Maschine vollständig durchgeführt.

Wenn es sich um eine Vergleichung verschiedener Modelle für gleiche Leistung handelt, berechnet man noch das gesamte Gewicht des zur Herstellung der Wickelung verwendeten Kupfers und das Gewicht des aufgewendeten Schmiedeeisens und Gusseisens.

7. Die Verlustberechnung.

Wir berechnen zuletzt noch die Verluste. Zu diesem Zwecke müssen einige Bestimmungen vorausgehen.

Die Anzahl der Ummagnetisierungen in einer Sekunde beträgt:

$$\sim = \frac{u \cdot p}{60} = \frac{1100 \cdot 1}{60} = 18.$$

Das Eisenvolumen V des Ankers beträgt:

$$V = \frac{l \cdot \pi}{4} \cdot \varkappa \cdot (D^2 - D_1^2) = 19 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0{,}85 \cdot (28^2 - 16{,}8^2) = 6300 \ ccm.$$

Es ergiebt sich nunmehr folgendes.

Der Verlust durch Hysteresis

$$\mathfrak{B}_{\mathfrak{h}} = \eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6} \cdot \sim \cdot V \cdot 10^{-7} \text{ Watt} = 0{,}004 \cdot 14000^{1,6} \cdot 18 \cdot 6300 \cdot 10^{-7} = 193 \text{ Watt.}$$

Der Verlust durch Wirbelströme

$$\mathfrak{B}_{\mathfrak{z}} = 32 \cdot (a \cdot \sim \cdot \mathfrak{B})^2 \cdot V \cdot 10^{-12} = 32 \cdot (0{,}05 \cdot 18 \cdot 14000)^2 \cdot 6300 \cdot 10^{-12} = 32 \text{ Watt,}$$

wobei wir die Dicke der Blechscheiben a = 0,05 *cm* angenommen haben.

Die von der Maschine nach aussen abgegebene nutzbare elektrische Energie beträgt: 142 × 65 = 9230 Watt.

Die Verluste betragen:

Stromwärme im Anker	= 562	Watt
Stromwärme in der Magnetwickelung 441 + 195	= 636	»
Hysteresisverlust	= 193	»
Verlust durch Wirbelströme	= 32	»
Verlust durch Lagerreibung und Luftwiderstand (geschätzt)	= 500	»
Summe der Verluste	= 1920	Watt.

$$\text{Nutzeffekt} = \frac{9230}{9230 + 1920} \cdot 100 = 83\,\%.$$

XXIII. Kapitel.

Berechnung einer vierpoligen Trommelmaschine mit Nutenanker und Stahlgussfeldmagneten.[1]

Die Maschine sei bestimmt für 220 Kilowatt, 425 Umläufe. Die Maschine soll leer 500 und bei voller Belastung 550 Volt geben, um Spannungsverluste im Leitungsnetze auszugleichen (Strassenbahngenerator).

1. Bestimmung des Ankers.

Es soll ein Trommelanker mit Nuten verwendet werden.

Man bestimmt zunächst den Ankerdurchmesser und wählt $\lambda = 0,63$. Es ergiebt Formel 7), S. 424:

$$D = 11 \sqrt[3]{\frac{220000}{0,63 \cdot 425}} = 102\ cm.$$

Nach Formel 8) erhält man, wenn man einen Ankerverlust durch Stromwärme von 3400 Watt annimmt:

$$D = \sqrt{\frac{20 \cdot 3400}{\pi\,(2 \times 0,63 + 1)}} = 98\ cm.$$

Wir wählen demnach im Mittel $D = 100\ cm$. Alsdann ist die Umfangsgeschwindigkeit v

$$v = \frac{100 \cdot \pi \cdot 425}{60} = 2226\ cm.$$

Diese Umfangsgeschwindigkeit erscheint jedoch zu gross; es sei etwa vom Besteller gefordert, der Wert von 1800 *cm* solle nicht überschritten werden. Alsdann ergiebt sich:

$$D = \frac{1}{\pi} \cdot 1800 \cdot \frac{60}{425} = 81\ cm \text{ und } l = 81 \cdot 0,62 = 50\ cm,\ c = 40.$$

---

[1]) Dieses vorzügliche Beispiel rührt vom Ingenieur Van der Hecht her, und ist Gérard, Leçons sur l'Électricité, Bd. I, S. 620 u. s. f. entnommen. Einige Rechenfehler sind verbessert worden.

Die Berechnung der Anzahl m der Drähte auf der Ankeroberfläche erfolgt nach der Formel 11, S. 425) und ergiebt:

$$m = \frac{E \cdot a \cdot 60 \cdot 10^8}{2 \cdot c \cdot l \cdot \mathfrak{B}_p \cdot u \cdot p} = \frac{550 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 10^8}{2 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 40 \cdot 7000 \cdot 425 \cdot 2} = 270.$$

Es soll Reihenschaltung mit zwei parallel geschalteten Ankerstromkreisen gewählt werden. Um eine bequeme Anordnung zu erhalten, setzt man m = 274, ordnet die Stabwickelung in 137 Nuten an und wählt einen Kollektor mit 137 Lamellen. In jede Nute werden somit zwei übereinander liegende Stäbe untergebracht. Fig. 290 erläutert das Prinzip der Wickelung und die Art der Verbindung.

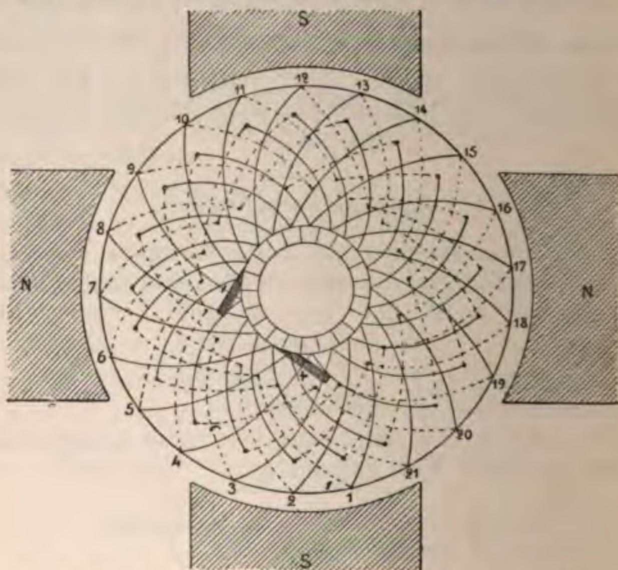


Fig. 290. Wickelung des Ankers der zu berechnenden Maschine.

Durch zweiteilige Gabeln, deren Mittelstück vorn mit dem Kollektor verbunden ist, verbindet man vorn den unteren Stab der Nute 1 mit einem Kollektorsegment und mit dem oberen Stabe der Nute $1 + \frac{137 - 1}{4} = 35$. An der Hinterseite verbindet man den oberen Stab in Nute 35 mit dem unteren Stab der Nute $35 + 34 = 69$. Das vordere Ende dieses Stabes wird mit der entsprechenden Kollektorlamelle und dem oberen Stabe der Nute $69 + 34 = 103$ verbunden u. s. f.

Man kann entweder zwei oder, wenn man den Kollektor schmäler halten will, auch vier paarweise parallel geschaltete Bürsten verwenden, die je um 90° voneinander abstehen.

Der mittlere Spannungsunterschied zwischen zwei Kollektorsegmenten beträgt: $\frac{4 \cdot 550}{137} = 16$ Volt.

Den Wattverlust in der Ankerwickelung durch Stromwärme nahmen wir zu 3400 Watt an. In der im Nebenschluss liegenden Feldwickelung soll nur $^1/_2$ % des Ankerstromes verloren gehen.

Der Ankerstrom beträgt:

$$i_a = 1{,}005 \cdot \frac{220000}{550} = 402 \text{ Ampère.}$$

Den Ankerwiderstand bestimmt man aus dem zugelassenen Wattverlust zu: $w_a = \frac{3400}{402^2} = 0{,}021$ Ohm.

Bei Vollbelastung bedingt dies in der Ankerwickelung einen Spannungsverlust vom Betrage: $i_a \cdot w_a = 402 \cdot 0{,}021 = 8{,}5$ Volt.

Beachtet man, dass die Ankerwickelung auf jeder Seite in 4 *cm* Abstand von den Enden des Ankers angeordnet wird, und wählt man für die Verbindungsstücke denselben Querschnitt, den die wirksamen Leiter besitzen, und führt man die Verbindungsstücke je um ein Viertel des äusseren Umfanges des Ankers herum, so erhält man für die Gesamtlänge der Ankerwickelung die Länge:

$$L = 274 \cdot \left(50 + 2 \cdot 4 + \frac{\pi \cdot 81}{4}\right)$$
$$= 33300 \; cm.$$

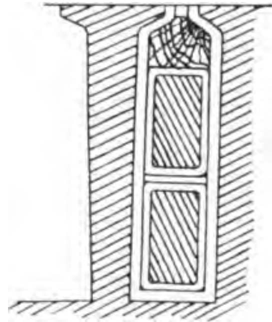


Fig. 291. Anordnung der Stäbe in den Nuten.

Nun ist der Ankerwiderstand w_a bei der angewendeten Schaltung gleich ein Viertel des Widerstandes der aufgewickelten Drahtlänge

$$w_a = \frac{\frac{1}{4} k \cdot l_a}{q_a}.$$

Hieraus folgt:

$$q_a = \frac{\frac{1}{4} k \cdot l_a}{w_a} = \frac{0{,}02 \cdot 33300}{4 \cdot 0{,}021} = 79{,}3 \; qmm.$$

Es entspricht dies einer Querschnittsbelastung von etwa 2,5 Ampère für 1 *qmm*.

Man verwendet daher etwa Kupferstäbe von 6,5 *mm* Dicke und 12,2 *mm* Breite.

Um die Wirbelströme in den dicken Kupferstäben möglichst zu vermindern, giebt man den Zähnen T form (vergl. Fig. 291) und legt zwei Stäbe übereinander in eine Nute.

2. Die Nuten und Zähne.

Die Stäbe werden mit einer 1 *mm* dicken Isolierschicht umgeben; die Wände der Nuten werden mit einer 1,5 *mm* dicken Isolation ausgekleidet und die beiden Stäbe durch einen 1 *mm* dicken Pressspan voneinander getrennt (vergl. Fig. 291). Dies bedingt eine Nutentiefe von 3,9 *cm*, eine gleichmässige Breite der Nuten von 1,15 *cm*. Die Zahnbreite am Zahnfusse wird:

$$\frac{\pi \cdot (81 - 2 \cdot 3,9)}{137} - 1,15 = 0,53 \ cm.$$

Wären die Zähne geradlinig begrenzt, so wäre ihre obere Breite

$$\frac{\pi \cdot 81}{137} - 1,15 = 0,705 \ cm.$$

3. Bestimmung des Kraftlinienstromes und des Eisenvolumens.

Veranschlagen wir den Spannungsverlust im Anker bei Vollbelastung zu 10 Volt, so beträgt, da bei Vollbelastung die Klemmenspannung 550 Volt sein soll, der erforderliche Kraftlinienstrom

$$\Phi = \frac{560 \cdot 10^8 \cdot 60}{274 \cdot 425} = 29\,100\,000 \text{ Linien.}$$

Bei Leerlauf soll die EMK nur 500 Volt betragen. In diesem Falle ist also:

$$\Phi' = \frac{500 \cdot 10^8 \cdot 60}{274 \cdot 425} = 25\,800\,000 \text{ Linien.}$$

Setzt man bei Vollbelastung die Sättigung im vollen Ankereisen (ausserhalb der Verzahnung) gleich 12000 Linien fest, so ergiebt sich, da der einfache achsiale Querschnitt nur von $^1/_4$ der Kraftlinien durchsetzt wird, der Eisenquerschnitt des Ankers Q_a

$$Q_a = \frac{7\,275\,000}{12\,000} = 605 \ qcm.$$

Der Kern ist 50 *cm* lang. Davon sind abzuziehen für fünf Ventilationsöffnungen von 0,8 *cm* im ganzen 4 *cm*, und für die isolierende Zwischenschicht zwischen den Blechen 7 *cm*. Es bleiben somit nur 39 *cm* als vom Eisen erfüllte Länge übrig.

Dadurch ergiebt sich für die radiale Höhe der Ankerbleche:

$$\frac{605}{39} = 15,6 \ cm.$$

Der innere Durchmesser des Ankers wird somit:

$$D_1 = 81 - 2\,(3,9 + 15,6) = 42 \ cm.$$

Das Eisenvolumen des vollen Teiles des Ankers ist alsdann:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot (\{81 - 2 \cdot 3{,}9\}^2 - 42^2) \cdot 39 = 109\,500 \; cbcm.$$

In der Verzahnung beträgt das Eisenvolumen:

$$V' = \frac{0{,}528 + 0{,}705}{2} \cdot 3{,}9 \cdot 3{,}9 \cdot 137 = 12800 \; cbcm.$$

4. Berechnung des Luftzwischenraumes.

Jedem Polbogen b giebt man einen mittleren Umfang von $b = 48$ *cm*, entsprechend einer Poloberfläche $Q_4 = 48 \cdot 50 = 2400$ *qcm*.

Nun ist 1,85 die Breite, die auf der Ankeroberfläche ein Zahn und eine Nute einnimmt. Die Zahl der Zähne, durch die Kraftlinien unter einem Pole in den Anker eintreten, ist demnach $\frac{48}{1{,}85}$. Mit Rücksicht auf die nützliche Streuung der Kraftlinien in der Nähe der Polecken vergrössern wir diesen Betrag um 10% und finden $1{,}1 \cdot \frac{48}{1{,}85} = 28{,}6$.

Die Fläche, durch die Kraftlinien in den Anker eintreten, wird dadurch $1{,}405 \cdot 50 \cdot 28{,}6 = 2010$ *qcm*.

Der Querschnitt des Luftzwischenraumes unter einem Pole kann danach im Mittel

$$2\,Q_{\mathfrak{L}} = \frac{1}{2}\,(2400 + 2010) = 2205 \; qcm$$

gesetzt werden.

Bei Vollbelastung ist daher die magnetische Sättigung im Luftzwischenraume:

$$\mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \Phi}{2\,Q_{\mathfrak{L}}} = \frac{14\,500\,000}{2205} = 6600 \text{ Kraftlinien.}$$

Nun soll, wenn $m \cdot i_a$ die Zahl der Ampèrewindungen des Ankers ist (nach Esson), höchstens:

$$m \cdot i_a = 192 \cdot \frac{\mathfrak{B}_{\mathfrak{L}} \cdot 2\delta}{\beta}$$

sein. Hieraus berechnet sich δ, die Dicke des Luftzwischenraumes:

$$\delta = \frac{274 \cdot \frac{402}{2} \cdot 66{,}5^0}{2 \cdot 192 \cdot 6600} = 1{,}45 \; cm.$$

Der für δ gefundene Wert ist ein Minimum, und davon ist noch die Dicke der Luftschicht abzuziehen, deren magnetischer

Widerstand dem der Verzahnung, der Zähne und Nuten zusammen, entspricht.

Um den magnetischen Widerstand der Verzahnung zu finden, geht man von einigen angenommenen Mittelwerten der magnetischen Sättigung in den Zähnen aus und bestimmt den entsprechenden magnetischen Widerstand der Zähne und Nuten, sowie den wirksamen Kraftlinienstrom, der diese Werte hervorbringt.

Die gefundenen Werte verbindet man durch eine Kurve, in der die magnetischen Widerstände die Ordinaten, die Kraftlinienströme Φ die Abscissen sind. Aus dieser Kurve ermittelt man den magnetischen Widerstand, der dem wirklichen Kraftlinienstrome entspricht.

Im vorliegenden Falle wählt man drei Punkte, die bei Höchstbelastung den mittleren Sättigungen 18000, 19000 und 20000 entsprechen.

Für $\mathfrak{B} = 18000$ ist die magnetische Permeabilität des Materials $\mu = 90$. Der mittlere Querschnitt eines Zahnes ist:

$$\frac{0{,}53 + 0{,}70}{2} \cdot 39 = 24 \ qcm.$$

Der magnetische Widerstand des Zahnes ist somit:

$$\frac{3{,}9}{90 \cdot 24} = 0{,}00181.$$

Der magnetische Widerstand der Luft in der Nute ist:

$$\frac{3{,}9}{1{,}15 \cdot 50} = 0{,}0678.$$

Der Kraftlinienstrom durchläuft 28,6 Stück dieser beiden parallel geschalteten magnetischen Widerstände. Der gesamte magnetische Widerstand der Verzahnung unter einem Pole ist demnach gleich:

$$\frac{1}{28{,}6} \cdot \frac{0{,}00181 \cdot 0{,}0678}{0{,}00181 + 0{,}0678} = 0{,}0000617.$$

Durch einen Zahn strömen:

$$18000 \cdot 24 = 432000 \text{ Kraftlinien.}$$

Durch einen Zahn und eine Nute zusammen fliessen:

$$432000 \cdot \frac{0{,}00181 + 0{,}0678}{0{,}0678} = 443000 \text{ Kraftlinien.}$$

Aus der Polfläche aus und in den Anker ein treten alsdann im ganzen:

$$\Phi = 443000 \cdot 28{,}6 = 12650000 \text{ Kraftlinien.}$$

Wiederholt man dieselbe Rechnung für die Sättigung 19000 und 20000, so findet man zur Konstruktion der Kurve die drei Punkte:

$\mathfrak{B}$	Magnetischer Widerstand der Verzahnung	Kraftlinienstrom Φ
18000	0,0000617	12650000
19000	0,0001007	13550000
20000	0,0001762	14800000.

Für den für uns gültigen Wert von $\frac{1}{2}\ \Phi = 14550000$, der bei Vollbelastung nötig ist, findet man aus der Kurve den magnetischen Widerstand der Verzahnung = 0,000157. Die mittlere magnetische Induktion bei Vollbelastung ist 19850.[1]) Bei Leerlauf war $\frac{1}{2}\ \Phi = 12900000$ und dem entspricht, wie wir ebenfalls der Kurve entnehmen, ein magnetischer Widerstand von 0,000071.

Der Kraftlinienstrom, der sich durch zwei Nachbarpole schliesst, durchläuft zweimal hintereinander den Widerstand, den die Hälfte der Verzahnung darbietet; der in Rechnung zu stellende magnetische Widerstand der Verzahnung ist daher:

$$4 \cdot 0{,}000157 = 0{,}000628.$$

Multipliziert man diesen Widerstand mit der halben Oberfläche des Luftzwischenraumes, so findet man für die Dicke einer Luftschicht von gleichem magnetischen Widerstand

$$0{,}000628 \cdot 1102 = 0{,}69\ cm.$$

Der kleinste zulässige Zwischenraum zwischen der Zahnoberfläche und der Oberfläche des Poles beträgt alsdann:

$$\frac{1}{2}\ (2{,}90 - 0{,}69) =$$
$$= 1{,}1\ cm.$$

Vom konstruktiven Standpunkte aus erscheint dieser Betrag durchaus unbedenklich.

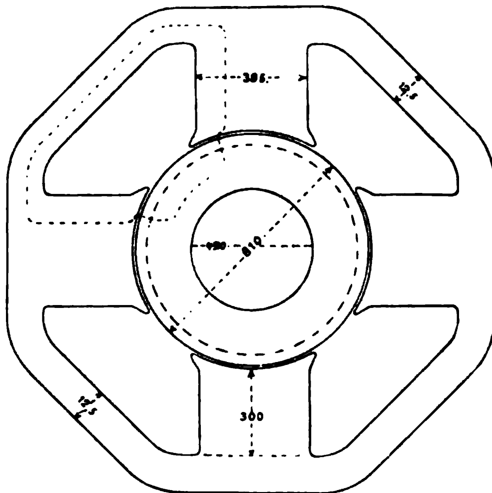


Fig. 292. Eisenteile der zu konstruierenden Maschine.

5. Berechnung der Feldmagneten (Stahlguss).

Zunächst wird nunmehr die Maschine in einem nicht zu kleinen Massstabe skizziert (vergl. Fig. 292).

---

[1]) Das ist ein verhältnismässig sehr hoher Wert.

Die Maschine besitzt vier magnetische Kreise, von welchen je zwei jeder Spule der Feldwickelung angehören. Wir betrachten nur den einen, der in der Figur gestrichelt angedeutet ist.

Den Streuungskoëffizienten müssen wir $\varepsilon = 1{,}2$ wählen. Die Sättigung in den Polstücken setzen wir auf $\mathfrak{B}_4 = 15000$ und in den Verbindungsstücken gleich 14000 fest.

Alsdann ergiebt sich für den Querschnitt eines Polstückes:

$$2\,Q_4 = \frac{\frac{1}{2}\,\varepsilon \cdot \Phi}{\mathfrak{B}_4} = \frac{17\,450\,000}{15000} = 1165\ qcm.$$

Bei kreisförmigem Querschnitt ergiebt dies einen Durchmesser von 38,5 *cm*.

Für die Verbindungsstücke erhält man:

$$Q = \frac{\frac{1}{4}\,\varepsilon \cdot \Phi}{\mathfrak{B}} = \frac{8\,725\,000}{14\,000} = 624\ qcm.$$

Dem entspricht ein Rechteck von 50 *cm* Breite und 12,5 *cm* Dicke.

Für die Polstücke wird eine Höhe von 30 *cm* (1,5 *cm* für die Spulenplatten) angenommen.

Mit Rücksicht auf die Gegenwindungen der Ankerrückwirkung sind im ganzen für Vollbelastung nötig:

$$n \cdot i = \frac{\alpha}{180} \cdot \frac{m \cdot i_a}{4\pi \cdot 2} + \frac{\Phi}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{l_a}{Q_a \cdot \mu_a} + 2\,\frac{\delta}{Q_2} + \frac{l_3}{Q_3 \cdot \mu_3} \right\} +$$
$$+ \frac{\varepsilon \cdot \Phi}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{l_4}{Q_4 \cdot \mu_4} + \frac{l_4}{Q_5 \cdot \mu_5} + \frac{l_6}{Q_6 \cdot \mu_6} \right\}.$$

Hierin soll sich beziehen der Index a auf den Ankerkern, δ und Q_2 auf den eigentlichen Luftzwischenraum, $\frac{l_3}{Q_3 \cdot \mu_3}$ ist der berechnete magnetische Widerstand der Verzahnung, während sich die Indices 4, 5, 6 auf Polschuh, Kerne der Elektromagneten und Verbindungsstück beziehen.

Die Weglängen der Kraftlinien werden aus der massstäblichen Skizze (vergl. Fig. 292) entnommen. Die magnetischen Daten sind Kurven entnommen, die für die verwendete Art Stahlguss besonders ermittelt worden waren.

Bei Vollbelastung.

Maschinenteil	Querschnitte	Weglänge der Kraftlinien	Kraftliniendichte	Permeabilität μ	Magnet. Widerstand $\frac{1}{\mu \cdot Q}$	Ampèrewindungen
	qcm	cm				
Anker	605	40	12000	1412	0,0000468	271
Verzahnung .	—	—	—	—	0,000626	3620
Luftzwischenraum	1102,5	$2 \cdot 1{,}1 = 2{,}2$	6600	1	0,002005	11610
Polschuhe . .	891[1])	$2 \cdot 2 = 4$	9800[2])	1865	0,0000024	17
Elektromagnetkerne	582	60	15000	526	0,000196	1360
Verbindungsstücke . . .	624	120	14000	823	0,000234	1625
						18503.

Nimmt man für den Winkel γ der Bürstenverschiebung 12° an, so findet man die durch die Ankerrückwirkung bedingte Anzahl von Ampèrewindungen $\frac{\alpha}{180} \cdot \frac{m \cdot i_a}{2} = \frac{36 \cdot 274 \cdot 402}{180 \cdot 2} = 3675.$

Für Vollbelastung, bei der eine Spannung von 550 Volt erzielt werden soll, sind somit $18503 + 3675 = 22178$ Ampèrewindungen nötig.

Bei Leerlauf sollen nur 500 Volt erzeugt werden. Alsdann gelten folgende Zahlen:

Bei Leerlauf.

Maschinenteil	Querschnitte	Weglänge der Kraftlinien	Kraftliniendichte	Permeabilität μ	Magnet. Widerstand	Ampèrewindungen
	qcm	cm				
Anker	605	40	10620	1815	0,0000364	187
Verzahnung .	—	—	—	—	0,000284	1459
Luftzwischenraum	1102,5	2,2	6600	1	0,002005	10290
Polschuhe . .	891	4	8700	2100	0,0000021	13
Elektromagnetkerne	582	60	13300	1275	0,000081	498
Verbindungsstücke . . .	624	120	12400	1450	0,00013	816
						13263.

6. Hauptstromwickelung der Magneten.

Auf die Hauptstromwickelung entfallen hiernach in jeder Spule

$$\frac{22178}{2} - \frac{13263}{2} \cdot \frac{550}{500} = 3794 \text{ Ampèrewindungen.}^{3)}$$

---

[1]) $Q_4 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2400 + 1165}{2} = 891.$ [2]) $\mathfrak{B}_4 = \frac{\frac{1}{4} z \cdot \Phi}{Q_4} = 9800.$

[3]) Die Multiplikation mit $\frac{550}{500}$ im Subtrahenden erfolgt, weil die Klemmenspannung bei Vollbelastung 550, bei Leerlauf 500 ist und demnach durch die gleiche Windungszahl verschiedene Stromstärken fliessen.

Bei einem Strome von 402 Ampère ergiebt dies

$$\frac{3794}{402} = 9{,}5 \text{ Windungen,}$$

wofür 11 Windungen angenommen werden.

Lässt man in der Hauptstromwickelung eine Belastung von 1,6 Amp. für 1 *qmm* zu, so ist der Querschnitt 2,5 *qcm*. Man benutzt daher für die Bewickelung zwei parallele Kupferbänder von 4 · 0,313 *cm*.

Wickelt man die Bänder übereinander, so ergiebt dies mit den isolierenden Zwischenschichten ungefähr 8 *cm* Dicke der Bewickelung. Für die Dicke des Spulengehäuses und Spielraum ist 0,75 *cm* zu rechnen.

Man erhält somit für die mittlere Länge einer Windung der Hauptstromspule:

$$\pi \cdot (38{,}5 + 2 \cdot 0{,}75 + 8) = 151 \; cm.$$

Der Widerstand dieser Wickelung für alle vier Magnetspulen ist:

$$4 \cdot 0{,}002 \; \frac{1{,}51 \cdot 11}{250} = 0{,}0053 \text{ Ohm.}$$

Dies ergiebt in der Hauptstromwickelung einen

$$\text{Spannungsabfall} = 402 \cdot 0{,}0053 = 2{,}1 \text{ Volt}$$

und einen

$$\text{Energieverlust} = 402^2 \cdot 0{,}0053 = 856 \text{ Watt.}$$

7. Nebenschlusswickelung der Magneten.

Diese soll für jede Spule die bei Leerlauf erforderliche Magnetisierung hervorbringen. Dazu sind für jede Spule 6632 Ampèrewindungen nötig, für vier hintereinander geschaltete Spulen somit 4 · 6632 = 26528 Ampèrewindungen.

Nach der schon früher (S. 448, Gleich. 18) verwendeten Formel findet man den Querschnitt des Drahtes

$$q' = \frac{i_a \cdot n \cdot l}{E' \cdot 50} = \frac{26528 \cdot 1{,}51}{500 \cdot 50} = 1{,}6 \; qmm.$$

Wir wählen hierfür einen Draht von 1,5 *mm* Dicke nackt, und 1,9 *mm* umsponnen. Auf 24 *cm* Länge kommen $\frac{240}{1{,}9} = 126$ Windungen in einer Lage. Nehmen wir eine Querschnittsbelastung von 0,82 Ampère für 1 *qmm* an, so ist die Stromstärke im Nebenschlussdraht bei Vollbelastung 1,52 Ampère. Demnach sind 26528 : 1,52 = 17450 Windungen aufzubringen. Jede der vier Spulen enthält somit $\frac{17450}{4 \cdot 126} = 34{,}9$ rund 35 Drahtlagen.

Der Effektverlust durch Stromwärme im Nebenschluss ist 550 · 1,52 = 837 Watt.

8. Wirkungsgrad der Maschine.

Verlust durch Stromwärme in der Ankerwickelung . .	3400	Watt
» » » » » Hauptstromwickelung	850	»
» » » » » Nebenschlusswickelung	840	»

Hysteresisverlust im vollen Ankereisen:

$$10^{-7} \cdot 0{,}00315 \cdot 2 \cdot \frac{425}{60} \cdot 12000^{1,6} \cdot 109\,500 = 1650 \text{ »}$$

Hysteresisverlust in den Zähnen des Ankers:

$$10^{-7} \cdot 0{,}00315 \cdot 2 \cdot \frac{425}{60} \cdot 19850^{1,6} \cdot 12800 = 430 \text{ »}$$

Wirbelstromverlust:

$$10^{-12} \cdot 32 \cdot \left(0{,}05 \cdot 2 \cdot \frac{425}{60} \cdot 12000\right)^2 \cdot 122\,300 = 5200 \text{ »}$$

Reibungsverlust (geschätzt auf 3% der nützlichen Leistung) . . . . = 6600 »

Summe der Verluste: 18970 Watt

$$\text{Wirkungsgrad } \frac{220\,000}{220\,000 + 18\,970} \cdot 100 = 92\,\%.$$

Ehe man nunmehr zur genauen Aufzeichnung einer berechneten Maschine und ihrer Teile verschreitet, sind noch verschiedene Nachprüfungen erforderlich, die sich vorzugsweise auf den funkenlosen Gang beziehen, und die meist noch verschiedene Abänderungen des ersten Entwurfes nötig machen. Man findet Ausführliches darüber bei Fischer-Hinnen, Gleichstrommaschinen S. 218 u. s. f.

XXIV. Kapitel.

Die Gleichstrommaschinen als Motoren.[1]

1. Die Umkehrbarkeit der Gleichstrommaschine.

Verbindet man die Polklemmen einer Gleichstrommaschine mit einer Stromquelle, die eine unveränderliche Spannung besitzt, so beginnt der Anker der Maschine zu rotieren; die Umlaufsgeschwindigkeit nimmt so lange zu, bis dem Bewegungsantrieb durch das Moment der der Drehung entgegen wirkenden Kräfte das Gleichgewicht gehalten wird. Mit der Zunahme der Umlaufszahl des Ankers nimmt gleichzeitig die Stärke des von der Stromquelle abgegebenen Stromes ab. Die Abnahme der Stromstärke beweist, dass sich in dem umlaufenden Anker eine elektromotorische Gegenkraft entwickelt. Die elektrischen Maschinen sind demnach umkehrbare Maschinen, die ebensowohl dazu dienen können, mechanische in elektrische Energie, als umgekehrt zugeführte elektrische Energie in mechanische Arbeit umzusetzen. Dynamomaschinen, die dazu dienen, mechanische Arbeit zu erzeugen, nennt man Elektromotoren.

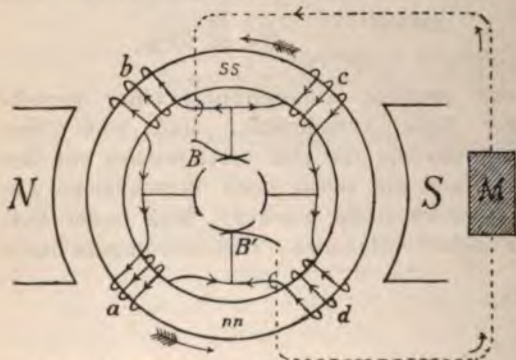


Fig. 293. Die Dynamomaschine als Elektromotor.

Wir betrachten beispielsweise einen einfachen Grammering mit 4 Spulen a, b, c, d, der sich in dem durch zwei Magnetpole N S hervorgerufenen Felde um eine Achse drehen kann (Fig. 293). Durch die beiden Bürsten B und B′ soll der von einer Elektrizitätsquelle M herrührende Strom in den Ring ein- und wieder abgeführt werden. Die Richtung

[1]) Vergl. auch die Betrachtungen in Kap. XX, Abschn. 2, S. 398.

des dann die Ankerwindungen durchfliessenden Stromes wird durch die Pfeile angedeutet. In dem Ankereisen wird dann oben ein magnetischer Süddoppelpol ss, unten ein doppelter Nordpol nn erregt werden. Die am doppelten Nordpole aus den Windungen der Wickelung austretenden Kraftlinien werden vom Nordpole N abgestossen, vom Südpole S des Feldes angezogen; der Ring wird sich somit entgegen der Richtung des Uhrzeigers drehen. Die beiden Magnetfelder, das von den Polen N und S erzeugte und das von den stromdurchflossenen Windungen des Ankers erzeugte, werden sich auch hier zusammensetzen (vergl. Kap. XIX, Abschn. 4, S. 365 und Fig. 249) und eine Verschiebung der neutralen Zone des Ankers, diesmal aber in einem der Drehrichtung des Ankers entgegengesetzten Sinne, hervorrufen.

Der Anker dreht sich entgegengesetzt der Richtung, in der er rotieren müsste, um einen in dem Sinne verlaufenden Strom zu erzeugen, in dem die Stromquelle M Strom durch den Anker sendet.

2. Die Leistung der Elektromotoren.

Nennt man I die Stärke des Stromes, den die Elektrizitätsquelle M durch den Anker der als Elektromotor dienenden Dynamomaschine sendet, und e die durch die Bewegung des Ankers im magnetischen Felde erzeugte elektromotorische Gegenkraft, so ist die in jeder Sekunde vom Elektromotor geleistete elektrische Arbeit p (vergl. Kap. II, Abschn. 5, S. 38)

$$p = I \cdot e \quad \dots\dots\dots \quad 1)$$

Wenn sich nun m Drähte auf der Ankeroberfläche befinden, der Anker u Umdrehungen in einer Minute macht, ferner das Gesamtfeld, welches durch die Pole NS im Ankereisen erzeugt wird, gleich Φ ist, so wird bekanntlich (man vergl. Kap. XX, Abschn. 1, Gleich. 1, S. 397)

$$e = \frac{m \cdot u \cdot \Phi}{10^8 \cdot 60} \quad \dots\dots\dots \quad 2)$$

sein. Daraus folgt dann:

$$p = \frac{I \cdot m \cdot u \cdot \Phi}{60 \cdot 10^8} \quad \dots\dots\dots \quad 3)$$

Ist der Spannungsunterschied, den die Stromquelle bei einer Stromstärke I an den Klemmen der Maschine hervorruft, gleich $\mathfrak{E}$, und. bedeutet W den Widerstand der Maschine, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze:

$$I = \frac{\mathfrak{E} - e}{W} \quad \dots\dots\dots \quad 4)$$

Setzt man dies in Gleich. 1) ein, so erhält man

$$p = e \cdot \frac{\mathfrak{E} - e}{W} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 5)$$

Wenn mit K das Drehungsmoment des Kräftepaares bezeichnet wird, das an der Achse des Elektromotors der Drehung entgegenwirkt, so ist die bei jeder Umdrehung geleistete Arbeit $2\pi \cdot K$. Bei u Umläufen in der Minute ist $\frac{2\pi \cdot K \cdot u}{60}$ die in einer Sekunde geleistete Arbeit. Demnach gilt, sofern man von allen Arbeitsverlusten durch Reibung, Foucaultströme und Hysteresis zunächst einmal absieht, mit Rücksicht auf Formel 1) näherungsweise die Gleichung:

$$\frac{2\pi \cdot K \cdot u}{60} = \frac{I \cdot m \cdot u \cdot \Phi}{60 \cdot 10^8}$$

oder

$$K = \frac{I \cdot m \cdot \Phi}{2\pi \cdot 10^8} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 6)$$

Insoweit als es zulässig erscheint, in rohester Annäherung die Energieverluste durch Reibung, Foucaultströme und Hysteresis in einer elektrischen Maschine zu vernachlässigen, wäre hiernach das Drehungsmoment unabhängig von der Geschwindigkeit und nur abhängig von der Stärke des Stromes und des magnetischen Feldes.

3. Der Wirkungsgrad elektrischer Maschinen und Motoren.

Dient eine Dynamomaschine als Stromerzeuger, so wird nur ein Teil der von der Riemscheibe aufgenommenen mechanischen Energie an den Polklemmen der Maschine in der Form von elektrischer Energie wieder gewonnen.

Ist L die von der Riemenscheibe in einer Sekunde aufgenommene Arbeitsgrösse[1]) (umgerechnet in Watt), sind ferner J, $\mathfrak{E}$ und W Stromstärke, Klemmenspannung und Gesamtwiderstand einer Maschine, so ist:

$$L = J \cdot \mathfrak{E} + J^2 \cdot W + a \quad \ldots \ldots \quad 7)$$

Die Grösse a enthält die Reibungswiderstände der Maschine (Luftwiderstand, Lagerreibung, Reibung der Bürsten auf dem Kollektor) und die unvermeidlichen Energieverluste durch Wirbelströme und Hysteresis.

Das Verhältnis:

$$\gamma = \frac{J \cdot \mathfrak{E}}{L} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

nennt man alsdann das **wirtschaftliche Güteverhältnis** des Stromerzeugers. Multipliziert man diesen echten Bruch mit 100, so erhält man den **wirtschaftlichen Wirkungsgrad in Prozenten.**

---

[1]) 75 *kgm* = 1 Pferdestärke = 736 Watt, 1 *kgm* = 9,81 Watt.

von diesem wirtschaftlichen Güteverhältnis und Wirkungsgrad sind wohl zu unterscheiden das elektrische Güteverhältnis und der in Prozenten ausgedrückte elektrische Wirkungsgrad (vergl. S. 38). Man versteht unter elektrischem Güteverhältnis den Quotienten aus der in der Maschine erzeugten elektrischen Energie und der an den Polklemmen nutzbar zur Verfügung stehenden Energie.

Bei grösseren Maschinen (über 10 Pferdestärken) ist der wirtschaftliche Wirkungsgrad nicht sehr verschieden, wenn man sie als Stromerzeuger oder als Motor laufen lässt.

Bezeichnet man die Klemmenspannung der stromerzeugenden Maschine wiederum mit $\mathfrak{E}$, die elektromotorische Gegenkraft des Elektromotors bei der Stromstärke J mit e, den Widerstand desselben mit W, so ist nach Gleich. 4)

$$\mathfrak{E} \cdot J = J^2 \cdot W + e \cdot J.$$

Hierin ist $\mathfrak{E} \cdot J$ die aufgewendete elektrische Energie, $J^2 \cdot W$ der Energieverlust durch Stromwärme und $e \cdot J$ die vom Motor geleistete Arbeit. Dann ist der elektrische Wirkungsgrad g des Motors:

$$g = \frac{e \cdot J}{\mathfrak{E} \cdot J} = \frac{\mathfrak{E} - J \cdot W}{\mathfrak{E}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 9)$$

Der Wirkungsgrad g ist Null, wenn e gleich Null ist, d. h. wenn der Anker des Elektromotors still steht; alsdann erreicht nach Gleich. 4) J seinen höchsten Wert, gleichzeitig erreicht die vom Elektromotor verbrauchte Arbeit ihren Höchstwert.

Wenn das der Drehung des Ankers entgegenwirkende Kräftepaar abnimmt, beginnt der Anker sich mit wachsender Geschwindigkeit zu drehen, und die elektromotorische Gegenkraft nimmt zu. Die vom Elektromotor in jeder Sekunde geleistete Arbeit:

$$p = e \cdot J = \frac{e \cdot (\mathfrak{E} - e)}{W}$$

nimmt zu, bis $e = \frac{\mathfrak{E}}{2}$ geworden ist. Das elektrische Güteverhältnis ist dann $^1/_2$.

Wenn die Umdrehungszahl des Ankers weiter wächst, nimmt p wieder ab, aber das elektrische Güteverhältnis wächst weiter und erreicht den Wert 1, wenn $e = \mathfrak{E}$ geworden ist. Dann aber wird gleichzeitig die Stromstärke $J = 0$ und $p = 0$. Alsdann verbraucht der Elektromotor keine, liefert aber auch keine Arbeit.

Alle diese Betrachtungen gelten, wie schon früher erwähnt, nur für einen idealen Fall, der in der Wirklichkeit nie erreicht werden kann, nämlich dann, wenn man von allen unvermeidlichen Verlusten im Elektromotor absehen kann, und der Anker sich in einem unabhängigen Magnetfelde von unveränderlicher Stärke bewegt.

In Wirklichkeit sind die Verluste durch Reibung, Foucaultströme und Hysteresis durchaus nicht zu vernachlässigende Grössen. Die an der Riemscheibe des Elektromotors verfügbare Nutzarbeit p'

$$p' = \frac{2\pi \cdot K \cdot u}{60}$$

ist stets nur ein Bruchteil von p = ei.

Der Bruch

$$\gamma = \frac{p'}{\mathfrak{E} \cdot J} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 10)$$

stellt den **wirtschaftlichen Wirkungsgrad des Elektromotors** dar. Die Nutzarbeit p' kann nach einer der in Kap. XVIII beschriebenen Methoden gemessen werden, während man an den Klemmen

Fig. 294. Abhängigkeit des Wirkungsgrades eines Elektromotors von der Umlaufszahl.

der Maschine die Spannung erhält, für die der Motor gebaut ist. Alsdann kann man die aufgewendete elektrische Arbeit, die an der Riemscheibe gewonnene Nutzarbeit und den wirtschaftlichen Wirkungsgrad als Funktion der Umlaufszahl u graphisch darstellen (vergl. Fig. 294, die sich auf Messungen an einem kleinen Elektromotor bezieht).

Denkt man sich eine Hauptstrommaschine einmal als Stromerzeuger laufend und dann bei gleicher Geschwindigkeit als Motor laufend, so ist, sofern auch die Bürstenverschiebung nahezu gleich gross, aber entgegengenetzt gerichtet ist, die im Anker entwickelte EMK e in beiden Fällen fast genau dieselbe. Hat auch die Stromstärke J denselben Wert, so ist der Verlust durch Stromwärme in beiden Fällen gleich gross, nämlich $J^2 \cdot W$. Ebenso werden die unvermeidlichen Verluste durch Reibung, Foucaultströme und Hysteresis sehr nahe gleiche Grösse haben; den Betrag aller dieser Werte wollen wir mit a bezeichnen. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad γ hat dann folgende Werte:

Wenn die Maschine als Stromerzeuger arbeitet,

$$\gamma_1 = \frac{e \cdot J - J^2 \cdot W}{e \cdot J + a} \quad \ldots \ldots \quad 11)$$

Wenn die Maschine als Motor arbeitet,

$$\gamma_2 = \frac{e \cdot J - a}{e \cdot J + J^2 \cdot W} \quad \ldots \ldots \quad 12)$$

Macht man, um die Werte vergleichen zu können, in den beiden Brüchen die Nenner gleich, so ist

$$\gamma_1 = \frac{(e \cdot J)^2 - (J^2 \cdot W)^2}{(e \cdot J + a) \cdot (e \cdot J + J^2 \cdot W)}$$

und

$$\gamma_2 = \frac{(e \cdot J)^2 - a^2}{(e \cdot J + a) \cdot (e \cdot J + J^2 \cdot W)}$$

Man sieht sofort ein, dass, je nachdem $J^2 \cdot W \gtreqless a$ ist, der Motor einen $\left\{\begin{matrix}\text{grösseren}\\ \text{gleichen}\\ \text{kleineren}\end{matrix}\right\}$ Wirkungsgrad hat, als wenn dieselbe Maschine als Stromerzeuger dient.

Da fast immer $J^2 \cdot W > a$ ist, so arbeitet dieselbe Maschine zumeist etwas günstiger als Elektromotor, wie als Stromerzeuger.

4. Methoden zur Messung der Verluste in einer Dynamomaschine.

Nach einem Vorschlage von Swinburne kann man die Grösse a näherungsweise bestimmen. Man lässt die zu untersuchende Hauptstrommaschine auf einen beliebigen Widerstand arbeiten und misst die Stromstärke J und die Klemmenspannung $\mathfrak{E}$. Alsdann ist der wirtschaftliche Wirkungsgrad

$$\gamma = \frac{\mathfrak{E} \cdot J}{\mathfrak{E} \cdot J + (w_s + w_a) \cdot J^2 + a} \quad \ldots \quad 13)$$

Nunmehr sendet man durch die Schenkelwickelung einen Strom von gleicher Grösse wie vorher und lässt auf den Anker eine zweite Stromquelle wirken, die bei einem Spannungsunterschied $\mathfrak{E}_1$ an den Bürsten und einer Stromstärke J′ den unbelasteten Anker mit derselben Geschwindigkeit zum Umlaufen bringt wie vorher. Alsdann ist die Grösse $\mathfrak{E}' \cdot J' - J' \cdot w_a$ nahezu gleich dem gesuchten Verluste a.

Hat man, was in Fabriken meist der Fall ist, zwei genau gleiche Maschinen zur Verfügung, so verbindet man die Achsen derselben durch einen Mitnehmer. Der einen Maschine führt man Strom aus einer Akkumulatorenbatterie zu und lässt sie als Motor laufen. Die andere Maschine dient als Stromerzeuger und arbeitet bei gleicher

Stromstärke auf einen regelbaren künstlichen Widerstand. Misst man an den Klemmen beider Maschinen Stromstärke und Spannungsunterschied, so ist der Quotient aus der elektrischen Energie an den Klemmen des Stromerzeugers und der an den Klemmen des Elektromotors gemessenen elektrischen Energie

$$\frac{\mathfrak{E}_2 \cdot J_2}{\mathfrak{E}_1 \cdot J_1} = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 14)$$

gleich dem Produkte der Wirkungsgrade beider Maschinen, somit nach Gleich. 11) und 12):

$$\frac{\mathfrak{E}_2 \cdot J_2}{\mathfrak{E}_1 \cdot J_1} = \frac{\mathfrak{E}_2 \cdot J_2 - a}{\mathfrak{E}_2 \cdot J_2 + J_2{}^2 \cdot W} \cdot \frac{\mathfrak{E}_1 \cdot J_1 - J_1{}^2 \cdot W}{\mathfrak{E}_1 \cdot J_1 + a} \quad . \; . \quad 15)$$

Hieraus kann a für die beobachtete Umlaufszahl berechnet werden, sofern man, was ohne wesentlichen Fehler zulässig ist, annehmen kann, dass a in beiden Maschinen denselben Wert habe, obgleich die Maschinen nicht genau unter denselben elektrischen Verhältnissen arbeiten.

Die bei verschiedenen Umlaufszahlen erhaltenen Werte von a trägt man dann als Funktion der Umlaufszahlen u in einem Diagramm graphisch auf.

Der wirtschaftliche Wirkungsgrad der Elektromotoren ist im allgemeinen um so grösser, je höher die Leistung derselben ist. Nachstehende kleine Tabelle giebt eine ungefähre Übersicht der in der Praxis zumeist üblichen Verhältnisse:

Leistung in Pferdestärken .	1	2	5	10	20	50	100
Wirtschaftlicher Wirkungsgrad	65%	78%	84%	88%	90%	91%	92%
Wattverbrauch für 1 Pferdestärke	1132	943	876	837	818	809	800

5. Hauptstrommaschinen als Elektromotoren.

Senden wir durch eine Hauptstrommaschine Strom in dem Sinne, in dem sie, als Stromerzeuger thätig, diesen Strom liefern würde, so behalten die Feldmagnete ihren Magnetismus bei, der Anker aber bewegt sich (vergl. S. 462) in entgegengesetzter Richtung.

Die vorher entwickelte Gleich. 6)

$$K = \frac{J \cdot m \cdot \Phi}{2\,\pi \cdot 10^8}$$

gilt ohne weiteres auch für Hauptstrommotoren, obgleich sie an jener Stelle für eine Maschine mit Fremderregung (konstantes Magnetfeld Φ) abgeleitet worden war. Da J den grössten Wert hat (vergl. Gleich. 4), wenn der Anker stillsteht und somit keine elektromotorische

Gegenkraft entwickelt, so ist auch das Drehungsmoment K, die Zugkraft am grössten, wenn der Anker stillsteht, da dann sowohl J, als auch die magnetische Feldstärke Φ ihren grössten Wert besitzen.

Der Motor beginnt, wenn das der Drehung entgegenwirkende Moment nicht sehr gross ist, mit beschleunigter Geschwindigkeit sich zu bewegen; dadurch wächst die elektromotorische Gegenkraft, und die Stromstärke nimmt ab. Mit der zunehmenden Stromstärke sinkt auch die Feldstärke Φ.

Wenn der Motor also etwa nur die eigenen Reibungswiderstände zu überwinden hat, strebt die Geschwindigkeit einem Grenzwerte zu, bei dem die elektromotorische Gegenkraft nahezu gleich der Klemmenspannung und die Stromstärke und die Feldstärke sehr klein sein würden. Bei grösseren Motoren kann die Geschwindigkeit so gross sein, dass die Festigkeit des Ankers durch die entwickelte Centrifugalkraft gefährdet würde. Ein unbelasteter Hauptstrommotor kann also, wenn er zu schwach belastet ist, durchgehen. — Bei Motoren für Strassenbahnwagen, die auf den Schienen aufsitzen, bei Motoren, die eine im Wasser befindliche Schiffsschraube bewegen, und bei den kleinen Maschinen, die man zum Antrieb von Nähmaschinen, Ventilatoren etc. benutzt, ist ein Durchgehen nicht zu fürchten, da bei denselben die passiven Widerstände verhältnismässig sehr gross sind.

Gerade darin aber, dass die Hauptstrommaschine bei ruhendem Anker, wenn also die Reibungswiderstände der Ruhe zu überwinden sind, das grösste Drehungsmoment besitzt, liegt ihr grosser Wert für einfache Fälle der elektrischen Arbeitsübertragung. Eine zweite Hauptforderung aber, die man an alle Elektromotoren stellt, ist die einer möglichst gleichbleibenden Umlaufszahl bei verschiedener Belastung. Diesen Anspruch erfüllt die Hauptstrommaschine nur sehr unvollkommen als Motor.

Nach Gleich. 2), S. 463 ist die EMK einer als Stromerzeuger thätigen Dynamomaschine, abgesehen von unveränderlichen Grössen, proportional der Umlaufszahl und der Feldstärke, sodass man schreiben kann

$$e = C \cdot u \cdot f' (J)$$

da die Feldstärke einer Hauptstrommaschine nach einer unbekannten Funktion f von der Stromstärke J abhängt.

Analog erhält man für den Hauptstrommotor, der von der eben erwähnten Maschine Strom empfängt,

$$e' = C' \cdot u' \cdot f' (J).$$

Fasst man ferner die Widerstände beider Maschinen und der zwischen beiden gelegenen Leitung mit dem Buchstaben $\mathfrak{W}$ zusammen, so ist:

$$e' = e - J \cdot \mathfrak{W} \text{ oder: } C' \cdot u' \cdot f' (J) = C \cdot u \cdot f (J) - J \cdot \mathfrak{W}.$$

Hieraus erhält man für die Umlaufsgeschwindigkeit des Motors u′ den Ausdruck:

$$u' = \frac{C \cdot u \cdot f(J)}{C' \cdot f'(J)} - \frac{J \cdot \mathfrak{W}}{C' \cdot f'(J)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

Für kleinere Stromstärken, also bei höheren Geschwindigkeiten infolge geringerer Belastung, wächst f′ (J) und f (J), wie wir aus den Kurven auf S. 136, Fig. 58 wissen, sehr nahe proportional J; dann ist also u′ ziemlich unveränderlich, solange u konstant ist. Bei höheren Stromstärken aber nimmt der Zähler des zweiten Gliedes proportional der Stromstärke zu, während f′ (J) (die Feldstärke) viel langsamer als die Stromstärke wächst. Der Nenner wächst also langsamer als der Zähler. Der Motor wird bei zunehmender Belastung demnach langsamer gehen. Wenn man u′ ziemlich konstant erhalten will, muss man daher in Gleich. 16) den Nenner des ersten Gliedes auch langsamer wachsen lassen als den Zähler. Dies erreicht man dadurch, dass man im Motor mit grösserer magnetischer Sättigung arbeitet als im Stromerzeuger, d. h. den Motor etwas kleiner baut, als den Stromerzeuger.

Wollte man Hauptstrommotoren ohne Vorschaltung eines Anlasswiderstandes in ein Verteilungsnetz mit nahezu unveränderlicher Spannung 𝔈 einschalten, so würde, so lange der Anker ruht und eine E M Gegenkraft im Anker deshalb noch nicht vorhanden ist, die Stromstärke 𝔍 den Höchstbetrag 𝔍′:

$$\mathfrak{J}' = \frac{\mathfrak{E}}{w_a + w_s}$$

erreichen, wenn w_a den Ankerwiderstand und w_s den Widerstand der Wickelung der Feldmagnete bedeutet.

Da nun w_a und w_s, um einen guten elektrischen Wirkungsgrad zu erhalten (vergl. Gleichung 18), möglichst klein gewählt werden, könnte die Stromstärke 𝔍′ leicht einen so grossen Wert annehmen, dass die Drähte, zumal die des Ankers, über die zulässige Temperaturgrenze erwärmt und die Isolation der Drähte beschädigt würde.

Man muss daher vor den Motor einen regulierbaren Anlasswiderstand w schalten, dessen Betrag so bemessen wird, dass die höchstmögliche Stromstärke 𝔍′

$$\mathfrak{J}' = \frac{\mathfrak{E}}{w_a + w_s + w} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 17)$$

auch in der meist kurzdauernden Periode des Anlaufens des Motors den zwei- bis dreifachen Wert der Stromstärke bei der grössten zulässigen Dauerleistung nicht überschreiten kann.

Der elektrische Wirkungsgrad des Hauptstrommotors η ist:

$$\eta = \frac{\mathfrak{J} \cdot e}{\mathfrak{J} \cdot \mathfrak{E}} = \frac{\mathfrak{J} \cdot e}{\mathfrak{J} \cdot e + \mathfrak{J}^2 \cdot (w_a + w_s)} = \frac{e}{e + \mathfrak{J} \cdot (w_a + w_s)} \quad 18)$$

wenn e die EMK im Anker bezeichnet.

Man erkennt leicht, dass sich der Wirkungsgrad η um so mehr der Einheit nähert, je kleiner der Betrag $\mathfrak{J} \cdot (w_a + w_s)$ ist. Da nun die Stromstärke $\mathfrak{J}$ von der Leistung abhängt, die man dem Motor abverlangt, kann man η nur dadurch möglichst gross machen, dass man für $w_a + w_s$ so kleine Werte wählt, als dies irgend aus wirtschaftlichen Gründen (zumal mit Rücksicht auf den Preis der Maschine) angängig erscheint.

Hauptstrommotoren werden vorzugsweise für die Fortbewegung von Fahrzeugen verwendet, da kommt die grosse Anzugskraft beim Anfahren sehr zu statten, weil die Reibung der Ruhe sehr viel grösser ist, als die des fahrenden Wagens, und weil den beträchtlichen Massen, die bewegt werden sollen, Beschleunigung und lebendige Kraft erteilt werden muss.

Aber auch während der Fahrt sind grosse Abstufungen der Geschwindigkeit wünschenswert.

Die Regulierung der Zugkraft und damit der Geschwindigkeit der Hauptstrommotoren kann auf sehr verschiedene Weise bewerkstelligt werden.

Zunächst kann dies geschehen durch Änderung des Vorschaltwiderstandes w. Vergrössert man w, so wird ein Teil der Spannung von der Grösse $\mathfrak{J} \cdot w$ vernichtet. Die Gegenspannung des Ankers sinkt um den entsprechenden Betrag dadurch, dass sich seine Umlaufsgeschwindigkeit verringert. Diese Art der Regelung ist zwar sehr einfach, aber insofern unzweckmässig, weil ein erheblicher Teil der elektrischen Energie in diesem Vorschaltwiderstand fortwährend unnütz in Wärme umgewandelt wird.

Ein anderer Weg zur Regelung der Geschwindigkeit ist der, dass man die Bewickelung der Feldmagnete in mehrere Teile teilt und diese Teile entweder sämtlich hintereinander geschaltet oder in Gruppen parallel und diese Gruppen hintereinander geschaltet oder alle Teile parallel oder endlich überhaupt nur einzelne oder mehrere Teile der Magnetwickelung vom Strome durchfliessen lässt (Methode von Marcel Deprez und von Sprague). Man verändert auf diese Weise die Stärke des Magnetfeldes und damit die Geschwindigkeit, mit der sich der Anker dreht.

Statt die Windung der Feldmagnete in Teile zu teilen, kann man auch der Feldwickelung einen veränderlichen Widerstand parallel schalten. Je kleiner dieser Widerstand wird, um so geringer wird

die Stromstärke in den Feldmagneten, um so schwächer wird gleichzeitig das Magnetfeld, und um so grösser die Umlaufszahl des Ankers.

6. Die Ankerrückwirkung bei Elektromotoren.

Auch bei den Elektromotoren tritt infolge der für den funkenfreien Gang nötigen Bürstenverschiebung eine Ankerrückwirkung auf (vergl. Kap. XX, Abschn. 8, S. 411).

Denken wir uns beispielsweise (vergl. Fig. 295), dass bei einem zweipoligen Trommelanker die Bürsten entgegen der Drehrichtung des Ankers verschoben, an den Punkten A und D anliegen.[1]) Die zwischen AC und BD liegenden Ankerwindungen bewirken eine Quermagnetisierung und veranlassen die Verdrehung der neutralen Zone. Die zwischen AB und CD gelegenen Ankerwindungen hingegen wirken den Ampèrewindungen der Feldwickelung entgegen, sie müssen also als Gegenwindungen bezeichnet werden. Will man den Einfluss dieser Gegenwindungen ausgleichen, so muss man die Anzahl der zur Überwindung der magnetischen Widerstände erforderlichen Ampèrewindungen der Feldmagnete um den Betrag der magnetischen Wirkung der Gegenwindungen des Ankers vergrössern. Ganz ähnlich, wie schon früher (Kap. XXI, Abschn. 5, S. 442) gezeigt worden ist, beträgt diese Anzahl der

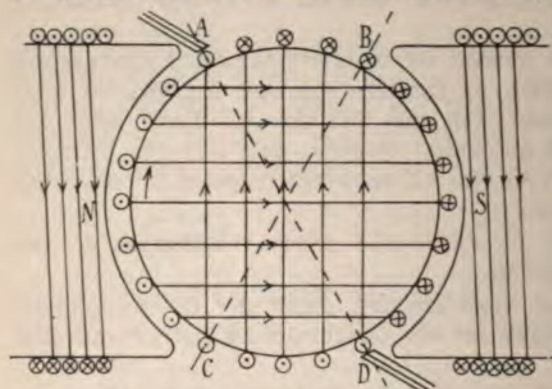


Fig. 295. Quer- und Gegenwindungen beim Elektromotor.

$$\text{Gegenwindungen des Ankers} = \varepsilon \cdot \frac{2\gamma}{360} \cdot \frac{m}{2} \cdot \frac{\mathfrak{J}_a}{2a} \quad . \quad . \quad 19)$$

wenn ε den Koëffizienten der schädlichen Streuung (vergl. S. 436), γ den Winkel des Bogens AB, m die Windungszahl des Ankers, $\mathfrak{J}_a$ die Ankerstromstärke und 2a die Anzahl der parallelen Ankerstromkreise bezeichnet.

[1]) Die Punkte in der Mitte der die Drähte bezeichnenden Kreise bedeuten, dass der Strom auf den Beschauer zufliesst. Man sieht gewissermassen die Spitze des die Stromrichtung bezeichnenden Pfeiles. Die Kreuze in den die Drähte bedeutenden Kreisen zeigen an, dass der Strom vom Beschauer fortfliesst. Man sieht die Fiedern der Pfeile.

7. Nebenschlussmotoren.

Die Drehrichtung des Ankers eines Hauptstrommotors fanden wir entgegengesetzt derjenigen, die man dem Anker geben musste, damit in der angeschlossenen Leitung ein Strom in derselben Richtung läuft. Unter denselben Verhältnissen läuft der Anker der Nebenschlussmaschine beide Male in gleichem Sinne, weil sich der Kraftlinienstrom in den Feldmagneten ebenfalls umkehrt; die Bürsten müssen jedoch entgegen der Drehrichtung um einen gewissen Winkel verschoben werden, wenn man einen funkenlosen Gang erhalten will.

Schaltet man einen ruhenden Nebenschlussmotor in einen konstanten Strom ein, so fliesst anfänglich sehr wenig Strom durch die im Nebenschluss liegende Wickelung der Feldmagnete, da deren Widerstand im Verhältnis zum Ankerwiderstande sehr gross ist. In der Gleich. 6)

$$K = \frac{J \cdot m \cdot \Phi}{2 \pi \cdot 10^8}$$

ist daher Φ sehr klein und demgemäss auch K sehr klein. Mit Belastung geht daher der Nebenschlussmotor in diesem Falle nur schwer oder auch gar nicht an. Um ihn mit Belastung zum Angehen zu bringen, und um ein übermässiges Erhitzen des Ankers zu vermeiden, schaltet man vor dem Anker einen veränderlichen Anlasswiderstand ein, den man allmählich verkleinert, bis der Anker die normale Umlaufszahl erreicht hat. Die Magnete werden dagegen sofort voll erregt.

Wenn der Anker sich bewegt und elektromotorische Gegenkraft entwickelt, fliesst mehr und mehr Strom auch durch die Feldmagnete, und der Motor kann nunmehr Widerstände überwinden.

Liegt der Motor im Nebenschlusse zu einer Hauptleitung, die auf konstantem Potential gehalten wird (z. B. bei einer Anlage mit parallel geschalteten Lampen), so fliesst von Anfang an durch den Nebenschluss, in dem die Feldmagnete liegen, ein konstanter Strom i_n. Alsdann nimmt das Drehungsmoment mit wachsender Geschwindigkeit ab, weil die den Anker durchfliessende Stromstärke wegen der steigenden elektromotorischen Gegenkraft geringer wird. Die Abnahme der Geschwindigkeit ist aber viel geringer als beim Hauptstrommotor, weil bei diesem Stromstärke und Feld gleichzeitig abnehmen, während beim Nebenschlussmotor das Feld nahezu konstant bleibt und nur durch die zunehmende Ankerrückwirkung geschwächt wird.

Die elektromotorische Gegenkraft e des Ankers ist:

$$e = \frac{u \cdot m \cdot \Phi}{60 \cdot 10^8} \text{ und auch } e = \mathfrak{E} - J \cdot w_a,$$

folglich:

$$u = \frac{60 \cdot 10^8 \cdot (\mathfrak{E} - J \cdot w_a)}{m \cdot \Phi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

Da der Ankerwiderstand w_a meist sehr klein ist und das Feld Φ infolge der Rückwirkung des Ankers (zumal bei Ringankern) mit zunehmender Stromstärke nur wenig sich ändert, bleibt, wenn der Beharrungszustand einmal erreicht ist, auch bei wachsender Belastung die Umdrehungszahl u des Nebenschlussmotors ziemlich konstant, und der Stromverbrauch ist nahezu proportional dem geleisteten Drehungsmoment K.

Diese Eigentümlichkeiten machen in Anlagen, in welchen die Verteilung der Energie bei konstanter Spannung erfolgt, den Nebenschlussmotor ganz ausserordentlich geeignet. Man benutzt daher für

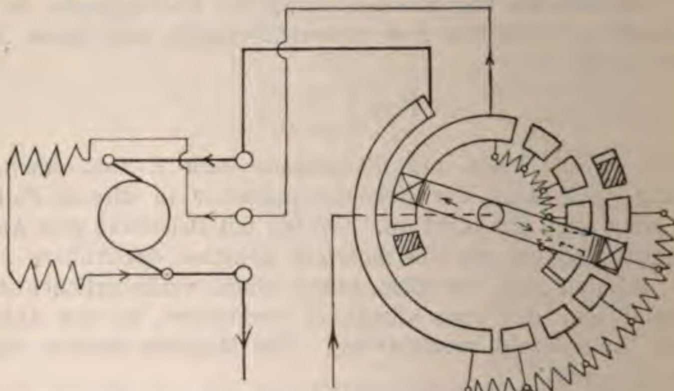


Fig. 296. Anlass- und Reguliervorrichtung für Nebenschlussmotoren.

den Betrieb mehrerer Werkzeugmaschinen verschiedenster Grösse nebeneinander in Verbindung mit Lichtanlagen mit parallel geschalteten Lampen und bei Arbeitsübertragungen auf grössere Entfernungen fast ausschliesslich Nebenschlussmotoren.

Die Regelung der Geschwindigkeit erfolgt bei Nebenschlussmotoren zumeist durch Änderung der Stärke des Feldmagnetismus; man legt daher zumeist auch vor die Feldwickelung einen regelbaren Widerstand oder gebraucht einen der in Abschn. 5 erwähnten Kunstgriffe.

Mit wachsendem Φ nimmt u ab. Eine für Nebenschlussmotoren geeignete Anlass- und Reguliervorrichtung[1]) zeigt Fig. 296. Solange der Motor noch nicht eingeschaltet ist, steht der Doppelhebel auf den schraffiert gezeichneten Kontakten aus Isoliermaterial. Bei

[1]) Diese Zeichnung ist Schmidt-Ulm, Gleichstrom-Dynamomaschinen, 2. Aufl., Leipzig, Oskar Leiner, 1900, entnommen.

Drehung der rechten Seite des Hebels nach unten wird der vor dem Anker liegende Vorschaltwiderstand allmählich ausgeschaltet. Läuft der Anker und ist der ganze Vorschaltwiderstand ausgeschaltet, so erfolgt die Regelung durch weiteres Drehen nach derselben Seite, wobei alsdann mehr und mehr Widerstand in den Nebenschlussstromkreis der Nebenschlussmagnete eingeschaltet wird.

8. Elektromotoren mit gemischter Wickelung.

Wenn man die Feldmagnete eines Elektromotors mit Wickelungen versieht, von welchen die eine im Nebenschlusse zum Anker liegt, die andere vom Hauptstrome durchflossen wird, so sind zwei Fälle möglich: Die vom Hauptstrome durchflossene Wickelung kann die magnetisierende Wirkung des Nebenschlusses verstärken, oder sie kann ihr entgegen wirken.

Die ersterwähnte Anordnung verbindet gewisse Eigentümlichkeiten der Hauptstrom- und der Nebenschlussmotoren. Man verwendet dieselbe besonders dann, wenn die Stromquelle nicht geeignet ist, die Spannung beim Angehen des Motors unveränderlich zu erhalten. Dann würde die Nebenschlusswickelung nicht ausreichen, um den belasteten Motor zum Angehen zu veranlassen; die vom Hauptstrome durchflossene Wickelung erzeugt aber in einem solchen Falle ein kräftiges Feld und unterstützt die unzureichende Wirkung der anderen Wickelung.

Man verwendet entgegengesetzt wirkende Wickelung der Feldmagnete, wenn bei stärkerer Belastung die Umlaufszahl zurückgeht. Dann legt man noch einige vom Hauptstrome durchflossene Windungen um das Schenkeleisen, durch die bei höheren Stromstärken die erforderliche Schwächung des Magnetfeldes bewirkt wird. Allerdings würde ein solcher Motor mit Differentialwickelung nicht angehen. Beim Anlassen kehrt man deshalb durch einen Umschalter die Stromrichtung in der vom Hauptstrome durchflossenen Wickelung um, bis der Motor die normale Umlaufszahl erreicht hat, und erst dann sendet man den Hauptstrom in einer dem durch die Nebenschlusswickelung fliessenden Strome entgegengesetzten Richtung durch die wenigen dicken Windungen.

Diese Anordnung kann man jedoch nicht verwenden, wenn die Belastung sehr stark schwankt, weil sonst die durch den Hauptstrom erzeugte Magnetisierung gelegentlich so stark wirken kann, dass der Magnetismus der Feldmagnete dadurch umgekehrt wird.

Eine Maschine mit gemischter Wickelung läuft wie ein Hauptstrommotor, wenn die Wirkung der direkten Wickelung überwiegt; sie läuft wie eine Nebenschlussmaschine, wenn die Nebenschluss-

wickelung die kräftiger wirkende ist. Tragen die Feldmagnete zwei Wickelungen, die sich unterstützen, wenn die Maschine als Stromerzeuger thätig ist, so wirken die beiden Wickelungen in entgegengesetztem Sinne magnetisierend, wenn die Maschine ohne Veränderung der Verbindungen als Motor arbeitet.

Wenn eine solche Maschine mit Differentialwickelung unveränderliche Umlaufszahl in gewissen Belastungsgrenzen halten soll, so müssen gewisse Bedingungen erfüllt sein, die man näherungsweise durch folgende Betrachtung findet. Wir setzen voraus, dass die Bürstenspannung $\mathfrak{E}$ unveränderlich erhalten wird und wir es mit einer Maschine mit langem Nebenschlusse (vergl. Kap. XIX, Abschn. 1, S. 355) zu thun haben. Dann ist:

$$e = \frac{m \cdot u \cdot \Phi}{60 \cdot 10^8}; \; e = \mathfrak{E} - i_a (w_a + w_s); \; \mathfrak{E} = w_n \cdot i_n$$

$$\Phi = n_n \cdot i_n \cdot f'(\mathfrak{B}) - n_s \cdot i_a \cdot f''(\mathfrak{B})$$

f ($\mathfrak{B}$) ist hierbei eine Funktion, die von der magnetischen Sättigung abhängt; n_n ist die Zahl der Nebenschlusswindungen, n_s die Zahl der vom Hauptstrome durchflossenen Windungen. Hieraus folgt:

$$u = \frac{\{w_n \cdot i_n - i \cdot (w_a + w_s)\} \cdot 60 \cdot 10^8}{m \cdot n_n \cdot i_n \cdot f'(\mathfrak{B}) - m \cdot n_s \cdot i_a \cdot f''(\mathfrak{B})}.$$

Soll nun u unveränderlich bleiben, so muss

$$\frac{w_n \cdot i_n}{m \cdot n_n \cdot i_n \cdot f'(\mathfrak{B})} = \frac{i_a (w_a + w_s)}{m \cdot n_s \cdot i_a \cdot f''(\mathfrak{B})}$$

sein, oder

$$\frac{n_n}{n_s} = \frac{w_n}{w_a + w_s} \cdot \frac{f''(\mathfrak{B})}{f'(\mathfrak{B})} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 21)$$

Da f′ ($\mathfrak{B}$) und f″ ($\mathfrak{B}$) nicht sehr voneinander verschieden sind, weil man meist nur wenige vom Hauptstrome durchflossene Windungen anwendet, und die Selbstregelung doch immer nur innerhalb gewisser, nicht zu weit voneinander entfernter Grenzen erreicht werden kann, so darf man in roher Annäherung

$$\frac{n_n}{n_s} = \frac{w_n}{w_a + w_s} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 22)$$

setzen (Regel von Ayrton und Perry).

In der Praxis verfährt man meist so, dass man die Feldmagnete des zu bewickelnden Motors mit einer beliebigen Versuchswickelung umgiebt und diese von einer Akkumulatorenbatterie oder von einer anderen Maschine aus mit einem messbaren Strome speist. Man schaltet vor den Anker einen Widerstand w ungefähr von der Grösse w_s und führt ihm Strom von der künftigen Klemmenspannung E zu. Nunmehr erregt man das Feld so stark, dass der Motor ohne

Belastung die gewünschte Umlaufszahl u erreicht. Die Zahl von Ampèrewindungen der Versuchswickelung, die man hierzu braucht, ist gleich $n_n \cdot i_n$. Da man nun die Stromstärke i_n im Nebenschluss nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten wählt, kann daraus die Windungszahl n_n bestimmt werden. Hierauf lässt man den Motor bei derselben Bürstenspannung $\mathfrak{E}$ mit voller Belastung laufen, beobachtet die erforderliche Stromstärke J und erregt gleichzeitig die Probewickelung so stark, dass wieder die Umlaufszahl u erreicht wird. Aus dem Unterschiede der Zahl von Ampèrewindungen der Probewickelung bei Leerlauf und Vollbelastung bestimmt man n_s die Zahl der Windungen, die künftig vom Hauptstrome durchflossen werden sollen.

9. Entwurf eines Elektromotors.

Im allgemeinen gelten die für den Entwurf eines Stromerzeugers aufgestellten Regeln (vergl. Kap. XXI) auch für Elektromotoren. Vielfach kommen jedoch noch besondere Ansprüche hinzu. Oft soll z. B. der Motor möglichst leicht sein; dann stellt man die Feldmagnete ganz aus Schmiedeeisen oder weichem Stahlguss her. Meist wünscht man möglichst geringe Bürstenverschiebung, um bei derselben Bürstenstellung den Motor vor- und rückwärts laufen lassen zu können. Um dies zu erreichen, muss das Feld möglichst stark und die Ankerrückwirkung möglichst klein gemacht werden; auch thut man gut, wenn man die Ankerrückwirkung verkleinern will, die Feldmagnete in der Richtung parallel dem Ankerdrahte aus einzelnen, magnetisch voneinander isolierten Blättern herzustellen (Lamellenmagnete herzustellen).

Um einen Elektromotor zu konstruieren, muss man sowohl die normale Leistung als die Höchstleistung kennen, sowie die Umlaufszahl u, mit der sich der Anker drehen soll. Ist nun q' die an der Riemenscheibe des Motors erforderliche Nutzarbeit (umgerechnet in Watt), ist ferner e die vom Anker entwickelte elektromotorische Gegenkraft und J die Stromstärke, so muss

$$e \cdot J = q'$$

sein. Die Grösse e wird aus der verfügbaren Klemmenspannung $\mathfrak{E}$ berechnet. Aus e und q' bestimmt man J, die Stromstärke, die dem Motor zugeführt werden muss.

Bei der Bestimmung der Drahtdicken muss man darauf Rücksicht nehmen, dass der Motor beim Anlassen oftmals ein ausserordentlich grosses Drehungsmoment entwickeln muss. Ist dieses maximale Moment gleich K', so ist:

$$K' = \frac{J' \cdot m \cdot \Phi}{2\pi \cdot 10^8}.$$

J' ist die hierzu erforderliche höchste Stromstärke. Die meisten Maschinen gestatten übrigens für kurze Zeiträume (unter einer Minute) die Anwendung einer zehnfachen Stromstärke, ohne dass die Ankerbewickelung und der Kollektor Schaden leidet.

Als Zahlenbeispiel wählen wir die Berechnung eines zweipoligen Elektromotors einer dem Lahmeyer-Typus (vergl. Fig. 297) ähnlichen Konstruktion für eine thatsächliche Leistung von 6,2 Pferdestärken. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad der Maschine soll ungefähr 84 %, die Umlaufszahl 1200 betragen. Der Motor soll von einer Anlage gespeist werden, in der die unveränderliche Spannung 170 Volt beträgt. Die Länge des Trommelankers soll nahe gleich dem Durchmesser, $\lambda = 0,9$, sein. Danach ist die Stromstärke J näherungsweise:

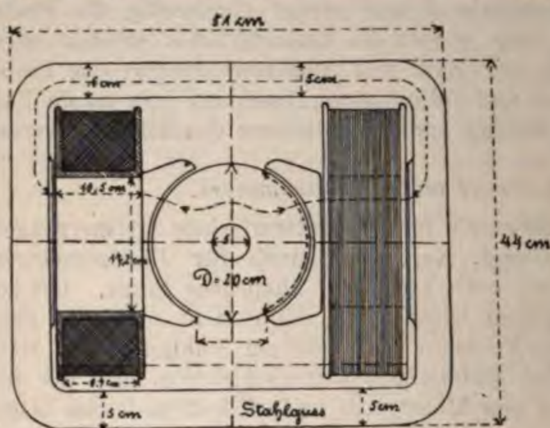


Fig. 297. Siebenpferdiger Nebenschlusselektromotor mit Stahlgussgestell.

$$J = \frac{p'}{E \cdot \eta} = \frac{6,2 \cdot 736}{150 \cdot 0,84} = 36 \text{ A.}$$

Lassen wir eine Belastung des Ankerdrahtes mit 2,25 A für je 1 *qmm* zu, so finden wir:

$$q = \frac{36}{2 \cdot 2,25} = 8 \; qmm.$$

Daraus berechnet sich der Durchmesser des Ankerdrahtes zu

$$d = 3,2 \; mm = 0,32 \; cm$$

und der Durchmesser des übersponnenen Drahtes

$$d_1 = 3,2 + 0,7 = 3,9 \; mm = 0,39 \; cm.$$

Den Trommeldurchmesser D wählt man gleich 20 *cm*. Hiernach ist die Trommellänge $l = 18$ *cm*.

Ferner wählen wir im Anker 60 Nuten und legen in jede Nute vier Drähte übereinander. Dann ist $m = 240$, $m_1 = 60$, $m_2 = 4$. Die Nuten erfordern dann für Unterbringung der Drähte und der Nutenisolation eine Tiefe von 1,90 *cm* und eine Breite von 0,52 *cm*.

Wir wählen die Zahl der Kollektorlamellen m_3 mit Rücksicht auf die gefundene Zahl $m = 240$, $m_3 = 60$.

Die mittlere Länge einer Windung ist rund 0,55 *m*, die Länge des Ankerdrahtes somit $240 \cdot 0{,}55 = 132$ *m* und der Ankerwiderstand

$$w_a = \frac{132}{50 \cdot 4 \cdot 8} = 0{,}082 \text{ Ohm}.$$

Der Spannungsverlust im Ankerdrahte ist hiernach:

$$36 \cdot 0{,}082 = 3 \text{ Volt}.$$

Bei den Motoren muss der Spannungsverlust von der Klemmenspannung abgezogen werden, ebenso der Spannungsverlust in der Hauptstromwickelung, den wir schätzungsweise, selbstverständlich viel zu reichlich, zu 7 Volt annehmen wollen. Nunmehr bestimmen wir die Feldstärke Φ nach Kap. XX, Abschn. 2, S. 397, Gleich. 1)

$$\Phi = \frac{(150 - 10) \cdot 60 \cdot 10^8}{1200 \cdot 240} = 29000.$$

Wir nehmen an, die Polstücke und die Magnetbügel seien aus Stahlguss, der Anker aus schmiedeeisernen Blechen mit Papierzwischenlagen herzustellen. Durch Beobachtungen an einer anderen Maschine gleicher Art ist der Streuungskoëffizient für die Polstücke auf 1,28, für den Magnetbügel auf 1,1, für den Anker zu 1 ermittelt worden.

Der innere Durchmesser des Ankers sei $D_1 = 5$ *cm*; das Verhältnis des Eisenquerschnittes zum Ankerquerschnitt sei $\varkappa = 0{,}9$.

Um den Querschnitt Q_2 des Luftraumes zu berechnen, nehmen wir an, der Polwinkel β betrage 120^0, so wird $c = 0{,}86\,D = 0{,}86 \cdot 20$ = rund 17 *cm*. Der kreisförmige Querschnitt der Elektromagnetkerne wird hiernach

$$17^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 226 \; qcm.$$

Die Magnetbügel stehen bei diesen Maschinen beiderseitig etwas über den Anker vor; wir machen dieselben etwa 23 *cm* und berücksichtigen, dass in den oberen und unteren Bügeln je nur die Hälfte der Kraftlinien verläuft. Wir wählen die Dicke gleich:

$$\frac{226}{2} : 23 = 5 \; cm.$$

Die Kraftliniendichte im Magnetkern beträgt, wenn wir den Streuungskoëffizienten 1,28 benutzen:

$$\frac{2900000 \cdot 1{,}28}{226} = 16500 \text{ Linien}.$$

Im Bügel ist die Dichte schon etwas kleiner, sie erreicht den Wert 16000.

Durch das Ansetzen eines Polschuhes ist der Polquerschnitt im Verhältnis von etwa 4 : 3 vergrössert. Seine Oberfläche beträgt daher:

$$\frac{23 \cdot \pi \cdot 18 \cdot 120}{360} \cdot \frac{4}{3} = 430 \; qcm$$

und die Kraftliniendichte in der Polschuhfläche beträgt:

$$\frac{16\,500 \cdot 226}{430} = 8670$$

und mit Rücksicht auf die schädliche und nützliche Streuung im Luftraume: 6550.

Die Breite eines Zahnes (oben) und einer Nute ist:

$$s + z = \frac{D \cdot \pi}{\text{Zähnezahl}} = \frac{20 \cdot \pi}{60} = 1{,}045 \; cm$$

und da jede Nute 0,52 breit ist, so wird $z = 0{,}52$ *cm*.

Die Breite am Zahnfusse ist: $\frac{\pi\,(20 - z \cdot 1{,}9)}{60} - 0{,}52 = 0{,}33.$

Die Kraftliniendichte am oberen Zahnrande wird:

$$D_2 = 6550 \cdot \frac{1{,}04}{0{,}52} = 13\,300.$$

Am unteren Zahnrande ist die Kraftliniendichte:

$$\frac{13\,300}{0{,}33} \cdot 0{,}52 = 20\,800.$$

Die mittlere Dichte in der Luftschicht ist hiernach:

$$\frac{6550 + 13\,300}{2} = 9425.$$

Dadurch wird, wenn wir den Luftzwischenraum $\delta = 0{,}30$ *cm* setzen, die Ampèrewindungszahl des Luftraumes:

$$9425 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}6 = 4520.$$

Wir erhalten hiernach:

Maschinenteil	Querschnitt	Sättigung	Kraftlinienweg	Ampèrewindungen für 1 *cm*	Ampèrewindungen
	qcm		*cm*		
Anker	190	15 600	19	28	530
Verzahnung	230	14 500	3,8	21	60
Magnetkerne	226	16 500	21	40	840
Verbindungsbügel	230	16 000	79	35	2770
Luftzwischenraum	—	9425	0,6	0,8	4520

Summe der Ampèrewindungen 8720.

Die im Nebenschluss liegende Wickelung erhält somit 8720 Ampèrewindungen.

Aus den Querschnitten der Eisenteile ergaben sich sofort die Dicken, wenn man annimmt, dass die Breite des Gestelles wenig grösser als die Ankerlänge ist. Aus der Aufzeichnung der Maschine (Fig. 297) sind die Längen des Kraftlinienweges gefunden, beziehentlich berechnet worden.

Die Werte für F ($\mathfrak{B}$) entnehmen wir in Fig. 58 (S. 136) der Linie für Stahlguss, den Wert f ($\mathfrak{B}$) der Kurve für Gusseisen.

Den Querschnitt des Drahtes finden wir, wenn wir die mittlere Länge einer Windung nach der Skizze zu 80 *cm* veranschlagen, nach der Formel:

$$\frac{0{,}80 \cdot 8180}{50 \cdot 130} = 0{,}01 \; qcm = 1 \; qmm.$$

Nehmen wir nun eine Querschnittsbelastung von 1,8 Ampère für 1 *qmm* in der Nebenschlussmagnetwickelung an, so sind im ganzen 8720 : 1,8 = 4840, auf jeder Spule somit 2420 Windungen nötig.

Der Durchmesser eines Drahtes von rund 1 *qmm* Querschnitt beträgt 1,2 *mm*. Durch die Umspinnung steigt der Durchmesser auf 1,7 *mm*.

Nehmen wir an, dass 9,7 *cm* im Innern der Spulenkästen für die Bewickelung verfügbar sind, so können 9,7 : 0,17 = 57 Drähte in eine Lage kommen, und es sind 2420 : 57 = 43 Lagen erforderlich. Die Höhe der Wickelung beträgt etwa 7,3 *cm*.

Nach Fischer-Hinnen muss, damit nicht die Magnetpole durch die Ankerrückwirkung entmagnetisiert werden können (vergl. S. 431, Gleich. 30),

$$m < 6{,}37 \frac{\mathfrak{B}_\mathfrak{L} \cdot p \cdot a \cdot \delta \cdot K'}{J_a \cdot \beta}$$

sein.

Es wird nach Einsetzen der Zahlen:

$$m < \frac{8500 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}3 \cdot 1{,}23}{36 \cdot 0{,}72} \text{ oder } m < 1200.$$

Das ist aber fünffache Sicherheit, da m = 240 ist.

Um die Ankerrückwirkung zu bestimmen, nehmen wir nach Erfahrungen mit ähnlichen Maschinen einen Bürstenverstellungswinkel von 20° an. Die Zahl der Ampèrewindungen, die auf die Ankerrückwirkung entfallen, sind alsdann:

$$\frac{\alpha}{180} \cdot \frac{m \cdot i_a \cdot 10}{2 \cdot 4\pi} = \frac{20}{180} \cdot \frac{240 \cdot 18 \cdot 10}{4\pi} = 320.$$

Dies giebt, wenn wir im Hauptstromkreis 36 Ampère rechnen, 9 Windungen.

Wir geben somit jeder Spule 5 Windungen, die vom Hauptstrom durchflossen werden, und bei einer Querschnittsbelastung von 1,8 Ampère aus Draht von 36 : 1,8 = 20 *qmm* Querschnitt oder 5,2 *mm* Dicke hergestellt werden.

Die Kontrollrechnungen über die Verluste und für die Erwärmung würden in derselben Weise vorzunehmen sein, wie für die früher mitgeteilten Beispiele. (Vergl. S. 449 und S. 461.)

Da es sich im vorliegenden Falle hauptsächlich nur um die auf Motoren bezüglichen Abweichungen handelte, verzichten wir hier auf deren Mitteilung.

10. Das Umsteuern der Elektromotoren.

Vielfach ist es nötig, die Elektromotoren bald in dem einen, bald in dem entgegengesetzten Sinne laufen zu lassen; wir erinnern z. B. an den Betrieb von Strassenbahnwagen, Motorbooten, Aufzügen, Drehbänken u. s. f.

Um die Drehrichtung des Ankers zu ändern, kehrt man, nachdem man durch Widerstände den Strom vorher genügend geschwächt hat, mit Hülfe eines Umschalters die Stromrichtung im Anker oder in den Feldmagneten um.

Wenn das von den Schenkelmagneten erzeugte Feld im Vergleich zu dem durch die Ankerwindungen erzeugten Felde sehr stark ist, oder eines von den in Kap. XX, Abschn. 9, S. 415 angegebenen Hülfsmitteln zur Verminderung der Bürstenverstellung angewendet worden ist, so genügt vielfach ein in der Halbierungslinie des Winkels der Achsen der Feldmagnete angebrachtes Bürstenpaar sowohl für die eine wie für die andere Drehrichtung des Ankers. Ist bei veränderter Drehrichtung eine Verschiebung die Bürsten nicht nötig, und bei neueren Elektromotoren ist das fast stets der Fall, so benutzt man als Stromabnehmer meist zwei breite Kohlenprismen, die durch

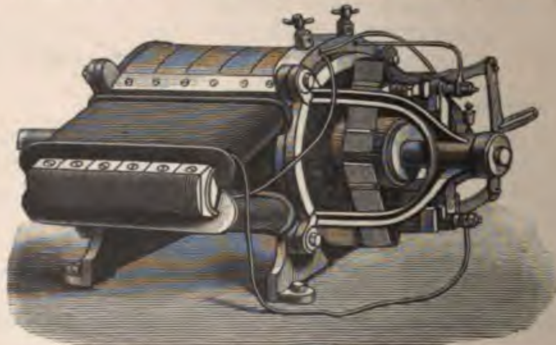


Fig. 298.

Federn sanft gegen den Umfang des Kollektors gedrückt werden. Ist jedoch die Bürstenverschiebung beträchtlich, oder benutzt man Bürsten, die unter einem Winkel gegen den Umfang des Kollektors

geneigt sind, so muss, wenn der Motor in entgegengesetzter Richtung laufen soll, das eine Bürstenpaar abgehoben und ein anderes dafür angelegt werden.

Die vorstehende Abbildung (Fig. 298) zeigt beispielsweise eine derartige Einrichtung an einem älteren Reckenzaunschen Elektromotor für Strassenbahnwagen mit Akkumulatorenbetrieb.

Durch eine Hebung oder Senkung des rechts sichtbaren Hebels wird gleichzeitig mit der Umsteuerung des Stromes im Anker das eine oder das andere der beiden Bürstenpaare an den Kollektor angelegt, je nachdem der Anker vorwärts oder rückwärts laufen soll.

Sprague hat eine andere Anordnung vorgeschlagen (Fig. 299), die es möglich macht, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Ankers zu ändern, ohne dass Widerstände ein- und ausgeschaltet werden müssen, und ohne dass eine Stromunterbrechung mit schädlicher Funkenbildung stattfindet.

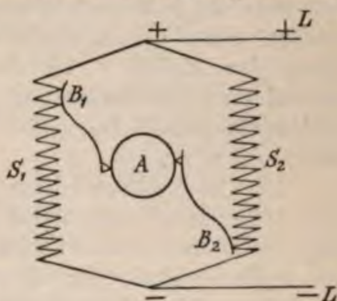


Fig. 299.

Die Feldmagnetwickelung besteht aus zwei Spulen S_1 und S_2, die zwischen der Zu- und Ableitung + L und — L des Stromes liegen (Fig. 299). Die Stromabnehmer B_1 B_2 des Ankers A können an verschiedenen Stellen dieser Windungen der Feldmagnete angelegt werden. Werden die Stromabnehmer B_1 B_2, die dem Anker den elektrischen Strom zuführen sollen, in der Mitte der beiden Windungen S_1 und S_2 angelegt, so fliesst nach dem bekannten Kirchhoff'schen Gesetz [1]) über Stromverzweigung zunächst gar kein Strom durch den Anker, und dieser übt kein Drehungsmoment aus. Verschiebt man die Berührungsstelle der Bürste B_1 nach der Seite des Stromaustrittes, die der Bürste B_2 entsprechend nach + L hin, so bewegt sich der Motor vorwärts, und sein Drehungsmoment nimmt um so mehr zu, je mehr die Verschiebung der Berührungsstellen in diesem Sinne erfolgt.

Verschiebt man aber von der Mitte aus die Berührungsstellen der Stromabnehmer B_1 B_2 mit den Elektromagnetwindungen S_1 S_2 in entgegengesetztem Sinne, so kehrt der Anker seine Drehungsrichtung um.

Ein neuer Anlass- und Steuerapparat für Nebenschlussmotoren, der von C. L. R. E. Menges [2]) herrührt, hat den grossen Vorzug,

---

[1]) Vergl. Kap. I, Abschn. 19, S. 19 u. 22, S. 24.
[2]) ETZ, Bd. XVIII, 1897, S. 731.

dass der aus Magnetwickelung R_s, Anlasswiderstand R und Ankerwickelung A gebildete Stromkreis nie unterbrochen wird. (Vergl. Fig. 300.)

Um die Bewegungsrichtung des Ankers umzukehren, wird der Strom im Anker allein umgeschaltet.

Ein in R_s etwa auftretender Induktionsstrom kann stets über R und A abfliessen, auch wenn sogleich nach dem Ausschalten bei a der Anker A umgeschaltet wird, wobei dann der Widerstand R mitwirkt, um Funken an dem Ankerkommutator und an der Umschaltevorrichtung zu vermeiden.

Zum Anlassen des Motors wird mittels des Hebels c erst die Stromzuleitung L_1 mit a verbunden, wodurch der Feldmagnet voll erregt wird und der Anker A, der durch den Anlasswiderstand R Strom erhält, in Bewegung kommt, worauf dann durch Weiterbewegung des Hebels c bis in die punktierte Betriebsstellung der Anlasswiderstand bei b kurzgeschlossen wird.

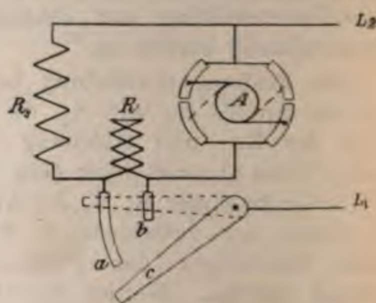


Fig. 300.

Die Umschaltvorrichtung für den Anker bringt man zweckmässig an dem Bürstenhalter des Motors an, wie in der Fig. 300 schematisch angedeutet ist, sodass durch das Umschalten auch die Bürstenstellung entsprechend geändert wird.

Eine andere Reversiervorrichtung für Nebenschlussmotoren, die dadurch ausgezeichnet ist, dass man bei ihr mit einem Satz regelbarer Widerstände auskommt, zeigt Fig. 301.

Man erzielt Linkslauf des Motors, wenn man den drehbaren Apparathebel aus der mittleren Ausschaltestellung nach der einen und Rechtslauf, wenn man den Hebel von der Mittelstellung aus nach der entgegengesetzten Seite bewegt.

Der Apparat besitzt Kontaktschienen, die in drei Kreisen mit verschiedenen Radien angeordnet sind. Die mittleren Kontaktstreifen sind rechts und links durch ein isolierendes Zwischenstück voneinander getrennt und mit der positiven und negativen Zuleitung vom Verteilungsnetz zum Motore verbunden. Die innersten, schmalen Schienen stehen mit den Klemmen der Magnetwickelung C und D in Verbindung. Die Ankerklemmen A und B sind einerseits an die grosse äussere Kontaktschiene, welche die ganze untere Hälfte bedeckt, angelegt, anderseits an den sogenannten Kurzschlusskontakt der oberen Hälfte angeschlossen.

Die einzelnen Stufen des Widerstandes sind, wie auch die Figur erkennen lässt, sowohl mit den linken Kontaktknöpfen 1, 2, 3, ... 9, als auch mit den rechts gelegenen Kontaktknöpfen 1, 2, 3, ... 9 leitend verbunden.

Die Schaltung erfolgt mittels dreier federnder Bürsten, die derartig auf den beiden Hälften des Schalthebels befestigt sind, dass zwar alle drei Bürsten je einer Hebelhälfte untereinander in leitender Verbindung stehen, dass sie jedoch vom Hebelkörper isoliert sind.

Wird der Hebel aus der Ausschaltestellung nach links bis auf den Kontakt 9 gedreht, so fliesst der aus der positiven Zuleitung stammende Strom über Kontakt 9 durch sämtliche vorgeschaltete

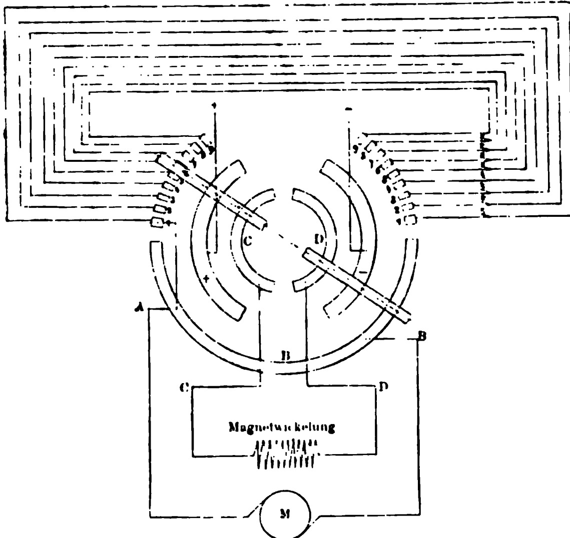


Fig. 301. Steuervorrichtung für einen Nebenschlussmotor.

Widerstände bis zum Kontakt 1, von da zur Ankerklemme, durch den Anker in der Richtung A B und durch die unterste äusserste Kontaktschiene zum negativen Pol der Zuleitung B, und vom innersten linken Schleifring durch die Nebenschlusswickelung in der Richtung von C nach D und durch den innersten rechten Schleifring zum negativen Pol der Zuleitung.

Der Hebel wird schliesslich bis 1 gedreht, dann bildet der Anker einen Kurzschluss zur Zuleitung und der Motor läuft mit voller Umlaufszahl.

Wenn man jedoch den Hebel zurück nach der vertikalen Stellung dreht, so wird dem Anker mehr und mehr Widerstand vorgeschaltet. Wenn der Hebel schliesslich auf Kontakt 9 steht, fliesst im Anker

nur noch ein so schwacher Strom, dass die Unterbrechung bei dem Übergange zur Ausschaltestellung fast funkenlos vor sich geht. Der Anker wird stromlos und kommt zur Ruhe.

Dreht man nun den Hebel aus der Ruhelage oben nach rechts zum Kontakt 9, so wird die äussere untere Kontaktschiene B mit der positiven Stromzuleitung verbunden, die Widerstandsspiralen dagegen, an welche die Klemme A angeschlossen ist, erhalten leitende Verbindung mit dem negativen Zuführungsdrahte.

Im Anker fliesst der Strom nunmehr entgegengesetzt wie früher, während der die Feldmagnete durchfliessende Strom die alte Richtung von C nach D beibehält. Der Motor wird sich daher in entgegengesetzter Richtung zu drehen beginnen. Dadurch, dass man von dem Kontaktknopf 9 auf 8 u. s. w. bis auf 1 in derselben Richtung weiter dreht, wird dem Anker abermals die volle Umlaufszahl, nunmehr aber in entgegengesetzter Richtung, erteilt.

XXV. Kapitel.

Einzelheiten des Baues von Dynamomaschinen.

1. Ankerkonstruktionen.

Wir erwähnten schon früher, dass der Eisenkern sowohl der Trommel- als der Ringanker zumeist aus dünnen, ringförmigen Scheiben von weichstem Eisen (von 0,4 bis 0,6 *mm* Dicke) hergestellt wird.

Die Nuten werden meist vor der Zusammenstellung der Ankerbleche durch Stanzen an den Scheiben angebracht. Einzelne Firmen fräsen die Nuten erst nach Fertigstellen des Ankereisens nachträglich ein.

Die einzelnen Scheiben werden entweder durch dünne Papier- oder Glimmerblättchen, oder einen Zinkoxyd enthaltenden Kopallack voneinander magnetisch isoliert. Die fertigen Bleche samt isolierender Zwischenschicht werden in kräftigen hydraulischen Pressen stark zusammengepresst. Die Schichtung erfolgt stets senkrecht zur Richtung der der Induktionswirkung ausgesetzten Drähte und so, dass die Ebene der Scheiben in die Richtung der magnetischen Kraftlinien zu liegen kommt. Einzelne Konstrukteure verwenden auch Eisenkerne, die aus lackiertem Eisendraht oder zusammengewundenen Eisenblechstreifen hergestellt sind. Bei Maschinen mit seitlichen Magnetpolen wird der Eisenkern aus Bandeisen hergestellt, das man mit einer Zwischenschicht von Papier auf eine Scheibe wickelt.

Bei Trommelankern wählt man die Kraftliniendichte $\mathfrak{B}_a$ zwischen 10000 bis 14000; in Ringankern geht man gelegentlich bis 18000 hinauf, um die magnetische Rückwirkung des Ankers zu verringern. Bei mehrpoligen Maschinen geht man selten über 14000 hinaus. (Vergl. S. 430.)

Um den Eisenkern auf der Welle zu befestigen, wird derselbe bei Ringankern auf einen aus Rotguss oder einem anderen nichtmagnetischen Metall hergestellten Stern aufgeschoben, der auf der Achse aufgekeilt ist; gleichzeitig dringen Vorsprünge oder Arme dieses Kernes in das Ankereisen selbst hinein. (Vergl. Fig. 305, S. 490.)

Bei Trommelankern verfährt man entweder ebenso, oder die Welle selbst erhält Kreuzform, und ihre Oberfläche wird zunächst mit einem magnetisch und elektrisch isolierenden Material überzogen. Die Scheiben werden dann auf die Welle selbst aufgereiht. Die Scheiben werden ausserdem durch zwei Rotgusssterne zusammengepresst. Vielfach werden auch noch verschraubte Bolzen aus nichtmagnetischem Metall verwendet, die aber durch isolierende Zwischenschichten von den Endplatten und dem Ankereisen getrennt werden müssen, damit keine Wirbelströme entstehen können.

Um die Abkühlung des Ankers zu begünstigen, sucht man es so einzurichten, dass die Luft sowohl innen als aussen rasch wechselt. Viele Fabrikanten führen sogar radiale Löcher durch das Ankereisen, um eine bessere Lüftung zu erzielen, oder sie bringen besondere Ventilatoren im Innern des Ankers oder neben demselben an. Besser ist es jedoch jedenfalls den Ursachen zu starker Erwärmung entgegen zu wirken, als nur auf Beseitigung entstandener Wärme bedacht zu sein.

Um den Luftzwischenraum zwischen dem Anker und den diesen umfassenden Polschuhen, der stets den weitaus grössten Teil des magnetischen Widerstandes verursacht, möglichst vermindern zu können, verwendet man neuerdings fast ausschliesslich Nutenanker.

Die Ankerwindungen werden in die zwischen den Zähnen befindlichen Nuten eingelegt.[1]) Die Ankerdrähte werden auf diese Weise vor jeder Beschädigung geschützt und können sich nicht auf der Ankeroberfläche verschieben; anderseits ist diese Anordnung nur zweckmässig, wenn man mit einer verhältnismässig geringen Anzahl von Windungen auf dem Anker auskommt, also für sehr grosse Feldstärken. Die Ankerrückwirkung bei solchen Ankern fällt immer wesentlich grösser aus, als bei glatten Ankern.

Die Kraftlinien verdichten sich erheblich in den Zacken, da der magnetische Widerstand auch des gesättigten Schmiedeeisens viel kleiner ist, als der der Luft. Die magnetische Sättigung im Luftraume wird daher geändert. Ist diese $\mathfrak{B}_2 = \frac{\Phi}{Q_2}$, so ist in die Berechnung der Bewickelung der Feldmagnete statt $\mathfrak{B}_2$ einzuführen:

$$\mathfrak{B}_2' = \mathfrak{B}_2 \cdot \frac{2\,d_1}{z' + d_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

wobei d_1 den Abstand der Mitten zweier benachbarter Drähte und z' die Breite einer Zacke bedeutet (vergl. Fig. 286, S. 438), oder man

[1]) Neuerdings werden auch vielfach Nutenanker mit **T** förmig übergreifenden Zähnen verwendet.

bestimmt den magnetischen Widerstand der Zähne für sich (vergl. Seite 455).

Ist δ_1 der Abstand der Zacken vom Polschuh, so wird die Länge des Luftzwischenraumes δ_1

$$\delta_1 = \sqrt{\delta^2 + \frac{1}{16}(d_1 - z')^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

angenommen.

Sehr zuverlässig berücksichtigt man die eigenartigen Verhältnisse bei Nutenankern nach dem Verfahren von Fischer-Hinnen unter Anwendung der Koëffizienten K und K′, wie dies auf S. 440 mitgeteilt worden ist.

In den Enden der Polschuhe entstehen beim Nähern und Entfernen der Zacken starke Wechselströme, die zu erheblicher Wärmeentwickelung und Energieverlusten Anlass geben. Es empfiehlt sich daher, entweder die Zacken abzurunden, T-förmig übergreifende Zacken zu verwenden, oder die Oberfläche des fertigen Ankers mit einer Lage ganz dünnen Eisendrahtes zu überwickeln. Noch bessere Erfolge erzielt man durch starkes Abrunden der äussersten Kanten der Polschuhe und besonders durch Herstellung der Polschuhe aus einzelnen, voneinander isolierten Eisenblechen.

Die nebenstehende Abbildung[1]) Fig. 302 erläutert die Wickelung eines Trommelankers mit Nuten, bei welcher jede der 24 Spulen aus 2 Lagen von je 4 parallel geschalteten Drähten besteht. Die vier ersten Spulen I, II, III, IV sind bei a, mit der Lage 1 beginnend, in der Reihenfolge der Zahlen gewickelt. Von 1 anfangend führt man die vier Drähte parallel der Achse auf der Oberfläche des Ankers hin, auf der hinteren Ankerfläche an der Welle vorüber über die äussere Fläche nach 2, dann an der vorderen Stirnfläche hin nach 3 und nunmehr an der anderen Seite der Welle vorüber nach 4, sodass die Lage 4 das Ende der ersten Spule bildet. Anfang und Ende einer Spule verbindet man immer mit zwei aufeinander folgenden

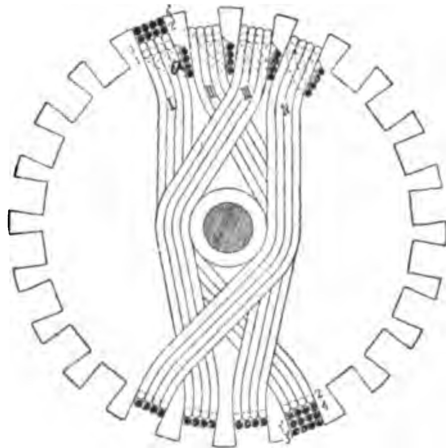


Fig. 302. Wickelung eines Trommelankers mit Nuten.

[1]) Nach E. Arnold, Die Ankerwickelung der Gleichstrom-Dynamomaschinen.

Kollektorsegmenten. Das Ende der einen und den Anfang der nächsten Spule verbindet man mit demselben Kollektorsegmente. Wenn alle 12 inneren Spulen gewickelt sind, werden die nächsten 12 darüber gewickelt. (In der Figur ist z. B. 1′ Anfang, 4′ Ende der 13. Spule).

Neuerdings werden bei Nutenankern oft drei Kollektorlamellen für eine Nute verwendet. Die Isolation nimmt dann weniger Raum ein, die Zahnbreite wird dadurch grösser, die Nuten fallen flacher



Fig. 303. Anordnung von drei Wickelungselementen in einer Nute.

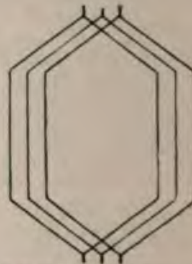


Fig. 304. Schablonenwickelung für drei Drähte in einer Nute.

aus. Die Fig. 303 zeigt z. B. die Anordnung der Drähte samt Isolation einer aus 4 parallelen Drähten hergestellten Wickelung in einer Nute. Die drei in einer Nute nebeneinander liegenden Drahtgruppen entsprechen drei aufeinander folgenden Wickelungselementen.

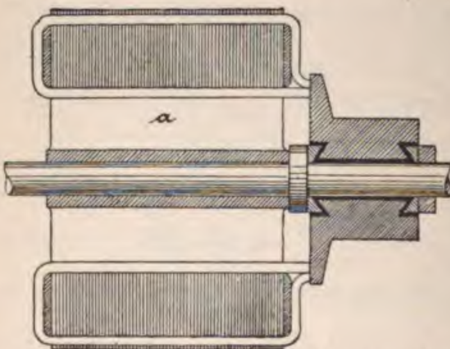


Fig. 305 a und b. Einrichtung und Befestigung eines Lochankers.

Diese drei Gruppen werden nach einer Schablone gebogen und gewickelt (vergl. Fig. 304) und die so entstehenden Formspulen fertig samt Isolation in die Ankernuten eingelegt.[1])

[1]) Näheres hierüber vergl. bei Rothert, ETZ., Bd. XXII. 1901. S. 317.

Die Abbildung, Fig. 305a und b, zeigt die Einrichtung eines Ringankers, bei dem die Drähte aussen, dicht unter der Oberfläche durch Löcher geführt sind (Maschinen von Brown und von Wenström). Derartige Anker werden bei Gleichstrommaschinen selten mehr angewendet, weil es schwer ist bei ihrem Gebrauche völlig funkenfreien Gang zu erzielen.

2. Der Kollektor, Bürsten und andere zum Anker gehörige Teile.

Die Fig. 305 und Fig. 306 lassen die Einrichtung, Gestalt und Befestigung des Kollektors und seiner Teile erkennen. (Die Isolation ist schwarz gezeichnet.)

Über die Zahl der Kollektorlamellen vergl. Kap. XXI, Abschn. 3, S. 426, Formel 14.

Bei Hochspannungsmaschinen darf, damit zwischen zwei benachbarten Lamellen kein Lichtbogen entsteht, die Spannung zwischen denselben 25 Volt nicht übersteigen.

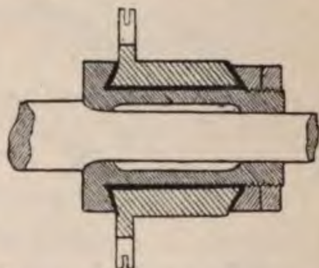


Fig. 306. Einrichtung des Kollektors.

Die einzelnen Segmente des Kollektors werden zumeist aus harter Bronze angefertigt, bei Anwendung von Kohlenbürsten aber aus Kupfer. Wenn Luftisolation zwischen den einzelnen Sektoren vorhanden ist (Siemens & Halske), benutzt man wohl auch Eisen.

Als Isolation der Kollektorsegmente voneinander dient indischer Glimmer, Pressspan, Fiber oder Asbest, gelegentlich auch, wie erwähnt, Luft. Für die Isolation der Segmente von den übrigen Metallteilen wird hartes Holz, Vulkanfiber, Micanit oder Asbest gewählt. Auf beste Isolation der Kollektorsegmente voneinander und von den übrigen Teilen des Maschinengestelles muss die grösste Sorgfalt verwendet und jeder Kollektor vor der Benutzung in allen seinen Teilen sorgsam geprüft werden.

Die Dicke der Isolation zwischen zwei Lamellen soll mindestens betragen, wenn Glimmer verwendet wird, bei:

Spannungen von	250 V	500 V	1000 V	2000 V
Dicke der Isolation	0,6 *mm*	0,8 *mm*	1 *mm*	1,2 *mm*

Die Drahtenden der Spulen werden am besten mit den Kollektorteilen verlötet, da sich Schrauben mit der Zeit im Betriebe leicht lockern.

Werden Schrauben verwendet, so ist eine Sicherheitsschraube nötig, durch die gleichzeitig jede Verschiebung des Kommutators unmöglich gemacht wird.

Die Länge des Kollektors hängt von der Bürstenauflagefläche ab. Den Durchmesser wählt man so klein, als dies aus Konstruktionsgründen möglich ist. Die Breite der Kollektorlamellen darf nicht unter 5 bis 6 *mm* herabgehen; der Querschnitt der Lamellen muss mindestens 1 *qmm* für 1 Ampère Stromstärke betragen.

Die Zahl und Grösse der aus Metall hergestellten Bürsten muss so gewählt werden, dass die Auflagefläche der Bürste mindestens



Fig. 307. Bürstenhalter für Metallbürsten von Siemens & Halske.

4 *qmm* für je 1 Ampère Stromstärke beträgt. Bei Anwendung von Kohlenbürsten sind 12 bis 15 *qmm* Auflagefläche für 1 Ampère erforderlich.

Man lässt immer mindestens zwei Bürsten gleichzeitig dasselbe Kollektorsegment berühren, damit auch während des Betriebes eine

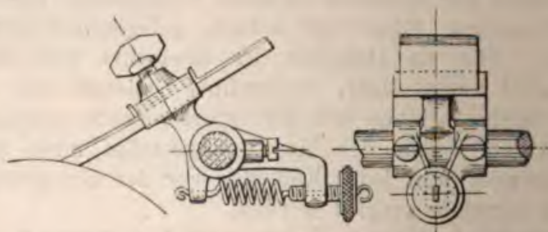


Fig. 308. Bürstenhalter für Drahtgazebürsten nach Brown.

derselben, wenn sie schadhaft geworden ist, ohne Unterbrechung des Stromes abgehoben und vorgerichtet werden kann.

Die obenstehende Abbildung Fig. 307 zeigt einen federnden Bürstenhalter (von Siemens & Halske), der sich sehr gut bewährt hat.

Eine etwas andere Einrichtung eines Bürstenhalters (nach Brown) ist in Fig. 308 abgebildet.

Die Bürstenhalter werden auf einem hölzernen Träger befestigt, welcher um einen Fortsatz des am Kollektor befindlichen Lagers gedreht werden kann. Diese Beweglichkeit ist nötig, damit die Bürsten bei verschiedener Belastung stets auf die Stelle eingestellt werden können, an der die geringste Funkenbildung stattfindet. Durch biegsame Kabelstücke werden die Bürstenhalter mit den Polklemmen der Maschine oder der Wickelung verbunden.

Für Motoren und kleinere Stromerzeuger mit nicht zu hohen Umlaufszahlen werden jetzt fast ausschliesslich Kohlenbürsten, oder Kohlenbürsten mit Metallbürsten verbunden (Schuckert) verwendet.

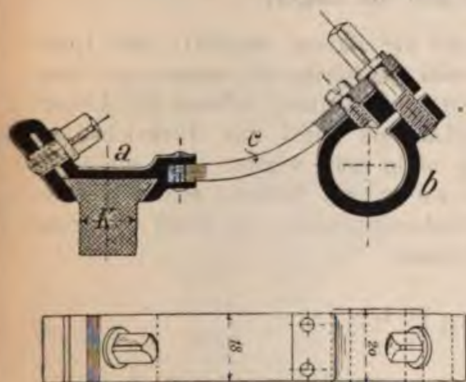


Fig. 309. Federnder Kohlenbürstenhalter nach Fischer-Hinnen.



Fig. 310. Bürstenbrücke für mehrpolige Maschinen nach Siemens & Halske.

Eine sehr zweckmässige Anordnung eines Halters für Kohlenbürsten zeigt Fig. 309 (nach Fischer-Hinnen). Der eigentliche Halter a und die Schellenklemme b werden aus Kupfer, die Druckfeder c aus einem Bündel hartgewalzter Messingstreifen hergestellt. K ist das Kohlenstück.

Bedingung für die erfolgreiche Anwendung von Kohlenbürsten ist eine mässige Oberflächengeschwindigkeit des Kollektors (nicht über 9 *m*).

Bei grossen mehrpoligen Maschinen dient häufig entweder die äussere Oberfläche oder auch die Vorderfläche des Ankers unmittelbar selbst als Kollektor. Dann sind besondere Bürstenträger erforderlich, die es ermöglichen, wenn nötig, alle Bürsten gleichzeitig anzulegen, abzuheben und zu verstellen. Ausserdem kann jedoch auch jede Bürste einzeln abgenommen werden. Fig. 310 stellt eine solche Einrichtung dar, wie sie z. B. von Siemens & Halske angewendet wird. Die Bürstenhalter sind an den Enden eines Sternes befestigt. Durch Bewegung des Hebels m kann man die Bürsten auf dem

Umfange des Kollektors verstellen. Wenn man durch die Handhabe m' auf das Zahnrad r' wirkt, wird eine zweite Scheibe gedreht, deren Vorsprünge durch Hebel mit den Bürstenhaltern in Verbindung stehen. Bei steilerer Stellung dieser Hebel werden die Bürsten gegen den Kollektor angedrückt; bei schräger Stellung des Hebels werden die Bürsten abgehoben.

Der Druck, mit dem die Bürsten auf den Kollektor aufliegen, soll bei Metallbürsten ungefähr 150 *g* für 1 *qcm* Auflagefläche, bei Kohlenbürsten etwa 250 *g* für 1 *qcm* Auflagefläche betragen.

3. Die Welle und die Lager.

Da bei Dynamomaschinen sehr viel davon abhängt, den Luftzwischenraum zwischen der äusseren Oberfläche des Ankers und dem Polschuh so klein als möglich machen zu können, müssen die Ankerwellen viel stärker gemacht werden, als sonst mit Rücksicht auf Festigkeit, Torsion und Biegung nötig sein würde. Man stellt die Wellen aus Stahl her und härtet sie an den Stellen, mit denen sie in den Lagern laufen. Den Wellendurchmesser $\mathfrak{d}$ (in *mm*) bestimmt man für Stahlwellen nach der Formel:

$$\mathfrak{d} < 200 \sqrt[3]{\frac{L}{u}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

wenn L die höchstmöglichste Leistung der Maschine in Pferdestärken und u die Umlaufszahl in der Minute bedeutet.

Die Länge l (in *mm*) der Lager bestimmt man nach dem Ausdrucke:

$$l = \mathfrak{d} \cdot (a + b \cdot u \cdot \sqrt{\mathfrak{L}}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Hierin ist $\mathfrak{L}$ der Abstand der Lager (in *cm*); man wählt nach Perry für Trommelanker und längliche Ringanker: a = 2 und b = 0,00018, für Ringanker von grossem Durchmesser und Scheibenanker a = 0 und b = 0,000063.

Oder man wählt die Lagerlänge für kleine Maschinen gleich dem 3,5 bis 4 fachen des Wellendurchmessers, bei mittelgrossen Maschinen gleich dem 2,5 bis 3 fachen und bei grossen Maschinen 2 bis 2,5 mal so gross als der Wellendurchmesser.

Um eine gleichmässigere Abnutzung des Kollektors zu erzielen, giebt man der Welle längs ihrer Achse etwas Spielraum in den Lagern.

Die Verkeilung erfolgt bei Bronzesternen mit zwei Keilen.

Wegen der hohen Umlaufszahl muss für stetige und gleichförmige Schmierung gesorgt werden.

Am besten haben sich Lager mit selbstthätiger Ringschmierung bewährt, wie solche schon lange an rasch laufenden Holzbearbeitungsmaschinen in Gebrauch sind. (Vergl. Fig. 311 a und b.) Über den Lagerhals der Welle sind Ringe aus Bronze von viel grösserem Durchmesser gelegt, die sich in einem Hohlraume der Lagerschalen frei bewegen können. Das untere Ende der Ringe r taucht in das Ölgefäss ein. Bei der Drehung der Welle werden die Ringe mitgenommen und versehen den Zapfen fortwährend mit Öl.

Unter dem Öl befindet sich eine Wasserschicht, in die etwa abgeschliffener Metallstaub von selbst untersinkt. Das Öl bleibt daher ziemlich rein und braucht nur selten erneuert zu werden.

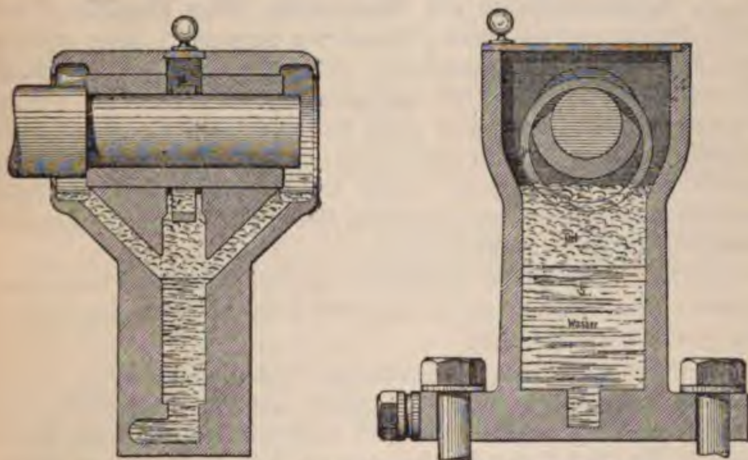


Fig. 311 a und b. Anordnung eines Lagers mit Ringschmierung.

Durch eine Öffnung am Boden des Hohlraumes kann von Zeit zu Zeit der entstandene Schmutz entfernt werden.

Will man die Lagerreibung besonders klein machen, so wendet man Kugellager an.

Durch Stellringe, die man neben den Lagern anordnet, muss dafür gesorgt werden, dass Öl, welches längs der Welle von den Lagern aus nach dem Anker hin vordringen will, abgeschleudert wird. Auch die Möglichkeit kleiner Verlängerungen der Welle durch Erwärmung muss berücksichtigt werden.

Die Breite $\mathfrak{b}$ der Riemenscheibe (in *cm*) wählt man

$$\mathfrak{b} = \frac{5\,L}{v} \text{ oder } \mathfrak{b} = 18\sqrt{\frac{L}{v}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 5)$$

wo L wieder die Leistung in Pferdestärken und v die Riemengeschwindigkeit in *m* ist.

Für die Riemenbreite β wählt man

$$\beta > 0{,}3\sqrt{\frac{L}{v}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

bei Lederriemen.

4. Die Feldmagnete.

Aus der früher entwickelten Theorie des magnetischen Stromkreises und aus praktischen Erfahrungen ergiebt sich, dass es am vorteilhaftesten ist, möglichst einfache, kurze und symmetrische Wege für die Kraftlinien zu wählen. Sind die Gestelle ganz aus Stahlguss oder Gusseisen hergestellt, so wählt man die Querschnitte derart, dass die Kraftliniendichte auf dem ganzen Wege ungefähr dieselbe bleibt. Werden verschiedene Eisensorten verwendet, oder wird das Gestell aus Teilen zusammengesetzt, so sorgt man durch Einschleifen und festes Verschrauben für möglichst innige Verbindung der sich berührenden Teile. Jeder Übergang der Kraftlinien von einem Stücke zu einem anderen bedingt eine nicht unerhebliche Vermehrung des magnetischen Widerstandes. Auch ist es zweckmässig plötzliche Querschnittsänderungen zu vermeiden, Ecken und Kanten des Schenkeleisens möglichst abzurunden.

Die Polschuhe werden möglichst reichlich bemessen; benachbarte Polspitzen oder -Kanten sollen einander nicht zu nahe kommen und sollen gut abgerundet sein.

Wenn man die magnetisierenden Spulen unmittelbar auf die Polschuhe aufschieben kann, so gehen weniger Kraftlinien durch Streuung verloren als bei anderen Anordnungen. Im allgemeinen ist jedoch die Gestalt der Magnetkerne und die Verteilung der Wickelung von geringfügigem Einfluss auf die Anzahl der erzeugten Kraftlinien.

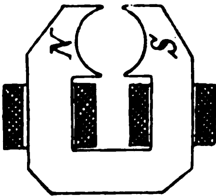
Stets wähle man die Form und Masse der Feldmagnete derart, dass ein reichlicher Wickelungsraum zur Verfügung bleibt, die Schenkelbewickelung eine ausreichende Oberfläche zur Ausstrahlung der Wärme besitzt und alle Teile der Maschine gründlich gelüftet werden.

Die nachstehenden Abbildungen stellen (nach G. Kapp) eine Anzahl der gebräuchlichsten Formen der Feldmagnete samt den zugehörigen Wickelungen in üblichen Abmessungen vor.

Fig. 312 zeigt eine sogenannte Hufeisenmaschine (Siemens & Halske, Gramme und viele andere), deren Magnetgestell einheitlich aus weichem Stahlguss hergestellt ist. Die nächste Fig. 313 zeigt eine Hufeisenmaschine mit schmiedeeisernen Elektromagneten (Kapp). Wird diese Maschine umgekehrt gestellt, sodass der Anker

unten, das Joch oben zu liegen kommt, so erhält man die Anordnung der Edison-Maschinen. Um zu verhüten, dass sich alsdann zu viele Kraftlinien durch die Fundamentplatte schliessen, wird zwischen diese und die Polschuhe eine starke Zinkplatte gelegt.

Fig. 314 stellt eine Form der Hufeisenmaschine mit einer einzigen magnetisierenden Spule dar (Maschinen von Schorch). Der





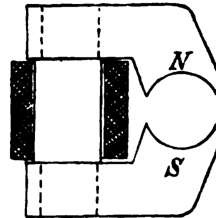
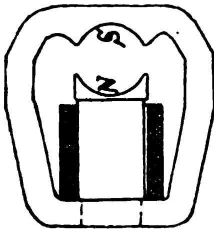


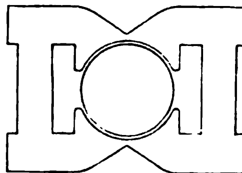
Fig. 312. Fig. 313.
Hufeisenmaschinen.

Fig. 314.
Maschinen von Schorch.

Elektromagnetkern ist aus Schmiedeeisen, die Polstücke aus Gusseisen bestehend angenommen.

Auch bei der in Fig. 315 dargestellten Anordung (Mordey) ist nur eine magnetisierende Spule vorhanden. Diese Gestalt wird





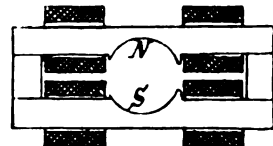


Fig. 315. Mordeygestell f. kleine Elektromotoren.

Fig. 316a. Sogenannte Manchestertype von Brown.

Fig. 316 b. Alte Form von Siemens & Halske.

besonders für kleine Elektromotoren von verschiedenen Firmen angewendet.

Die nächste Form (Fig. 316b) entspricht ganz den alten Siemens-Maschinen (Mod. D), nur mit dem Unterschied, dass man neuerdings nur noch selten die Kerne der Elektromagnete aus einzelnen schmiedeeisernen Stäben zusammensetzt, sondern meist massive Kerne mit reichlicheren Querschnitten vorzieht.

Ausserdem verweisen wir noch auf die in Fig. 297 (S. 478) und Fig. 211 (S. 324) dargestellten Formen, die beide sowohl für Stromerzeuger als für Elektromotoren sehr beliebt sind. Sie rühren

von van de Poel und Lahmeyer her (gewöhnlich Lahmeyer-Typus genannt).

Bei den Hufeisenmaschinen und verwandten Formen ist das Magnetfeld nicht ganz gleichmässig dicht, da durch den Teil des Ankers, zu welchem die Kraftlinien einen etwas weiteren Weg zurückzulegen haben, weniger Linien sich schliessen als durch den anderen. Dadurch entsteht ein einseitiger magnetischer Zug auf den Anker.



Fig. 317. Vierpolige Maschine älterer Form.

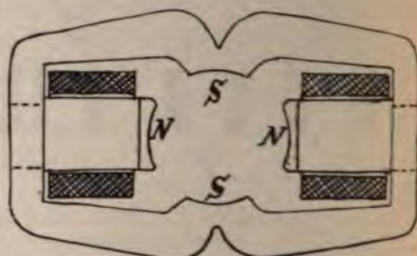


Fig. 318. Vierpolige Maschine mit zwei Spulen.

Die nächsten vier Abbildungen (Fig. 317, 318, 319, 320) zeigen Anordnungen der Feldmagnete für vierpolige Maschinen nebst den zugehörigen Wickelungen.

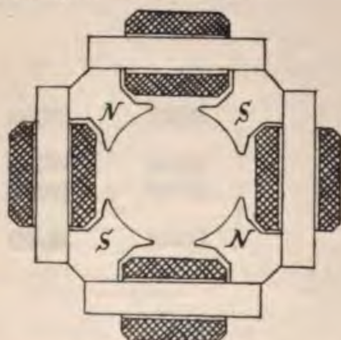


Fig. 319. Vierpolige Maschine von Alioth.

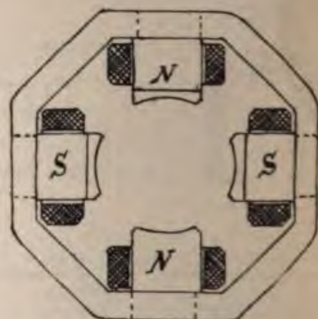


Fig. 320. Moderne vierpolige Maschine mit Stahlgussgestell.

Wir verdanken Kapp[1]) einen interessanten Vergleich der verschiedenen Systeme, auf die sich die vorstehend mitgeteilten Abbildungen beziehen.

Es ist wohl zu beachten, dass die sämtlichen Maschinen, für die hier Angaben zusammengestellt worden sind, nur mittlere Umlaufszahlen besitzen.

---

[1]) Kapp, Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom u. s. w., S. 159.

Das Maunetgestell entspricht der Abbildung[1])	Polzahl	Gesamt-Leistung in Kilo-Watt	Umdrehungszahl in 1 Minute	Anker: Durchmesser in *cm*	Anker: Länge in *cm*	Anker: Spannungsverlust im Anker in Prozenten	Feldmagnete: Eisengewicht der Feldmagnete in *kg*	Feldmagnete: Kupfergewicht der Schenkelwickelung in *kg*	Feldmagnete: Verlust an elektrisch. Energie in der Schenkelwickelung in % der Gesamtleistung	Feldmagnete: Temperaturerhöhung der Schenkelwickelung in Grad C.	Feldmagnete: Gewicht des Magnetsystems in *kg* für 1000 Watt Leistung[2])
Fig. 313 . . .	2	25	550	30	38	3,75	1170	190	3,5	33 ⁰	47
» 316a . .	2	25	550	30	38	3,75	1620	480	3,5	25 ⁰	72
» 314 . . .	2	25	550	30	38	3,75	2070	210	3,0	33 ⁰	79
» 211 . . .	2	25	550	30	38	3,75	2880	160	3,25	33 ⁰	103
» 316b . .	2	25	550	30	38	3,75	810	450	3,5	20 ⁰	43
» 317 . . .	4	80	380	60	50	2,5	1980	750	2	30 ⁰	40
» 320 . . .	4	80	380	60	50	2,5	3910	530	2	36 ⁰	67
» 318 . . .	4	80	380	60	50	2,5	4320	620	2	33 ⁰	73
» 319 . . .	4	80	380	60	50	2,5	2110	1170	3	25 ⁰	49

[1]) Bei allen Maschinen sind nur die Elektromagnetkerne aus Schmiedeeisen, die übrigen Teile aus Gusseisen hergestellt.

[2]) Berechnet unter der Annahme, dass die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers 10 *m* in 1 Sekunde betragen hätte.

Man bemerkt ferner, dass einem grossen Gewichte des Eisengestelles meist kleinere Gewichte des zur Wickelung erforderlichen Kupfers entsprechen, dass aber doch einzelne Konstruktionen sich durch besonders günstige Verhältnisse auszeichnen, so z. B. Fig. 316.

Je geringer die Leistungen sind, für die eine Maschine gebaut wird, um so kleiner fallen ihre Abmessungen aus, um so rascher wird man dieselben mit Rücksicht auf ihren kleinen Ankerdurchmesser laufen lassen müssen; die Winkelgeschwindigkeit muss in demselben Verhältnisse zunehmen, in dem der Ankerdurchmesser abnimmt, wenn die Umfangsgeschwindigkeit, auf die es bei den Induktionsvorgängen ankommt, dieselbe bleiben soll.



Fig. 321. Vielpolige Ringmaschine mit Gestell aus Stahl. Der Ring ist als Schwungrad ausgebildet.

Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass man nach Art der in Fig. 319 u. 320 dargestellten Modelle auch leicht Maschinen mit höherer Polzahl herstellen kann. Die vier- und sechspoligen Formen mit Cylinder-Trommelwickelung im Anker und Magnetgestell aus weichem Dynamostahlguss sind heute für mittlere und grössere Leistungen weitaus am verbreitesten.

Dabei wird vielfach der Polschuh nicht durch parallele Grade zur Ankerachse begrenzt, sondern man wählt eine schiefe Begrenzung, so dass z. B. an der vorderen Seite der Polschuh ein oder zwei Nuten früher bedeckt, als an der Hinterseite des Ankers. Man erreicht auf diese Weise leichter einen völlig funkenfreien Gang der Maschine.

Wenn aussergewöhnlich grosse Leistungen gewünscht werden, und man grosse Anker verwenden will, die unmittelbar als Schwungräder auf die Hauptwelle der Antriebsmaschine gesetzt werden sollen, empfehlen sich vielpolige Maschinen. Wegen des verhältnismässig geringen Gewichtes, der leichteren Herstellung und einfachen Zusammensetzbarkeit ist neuerdings in Deutschland, besonders für ganz grosse Maschinen, die in Fig. 321 dargestellte Form der vielpoligen Maschinen mit Aussenpolen beliebt geworden (Allg. Elektrici-

täts-Gesellschaft, Schuckert, Siemens & Halske u. a.), und zwar werden, wie auch die Abbildung andeutet, Ringanker und als Material Stahlguss bei denselben verwendet.

Gleichstrommaschinen mit grösserer Polzahl, die von der Firma Siemens & Halske, besonders für Elektrizitätswerke, vielfach gebaut worden sind, haben ebenfalls einen Ringanker. Die Elektromagnete bilden einen Stern, der sich innerhalb des Ringes befindet (vergl. Fig. 322); der äussere Umfang des Ringes wird bei grösserer Polzahl zum Kollektor ausgebildet. Man nennt solche Maschinen Innenpolmaschinen.

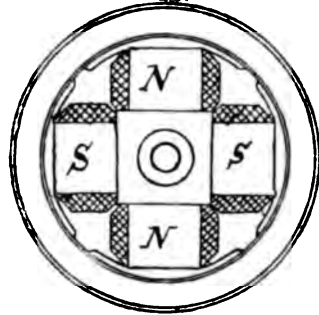


Fig. 322. Innenpolmaschine von Siemens & Halske.

Vorzügliche Einzelzeichnungen ausgeführter Gleichstrommaschinen verschiedenster Grösse der besten Firmen für die mannigfaltigsten Zwecke findet man in den Werken: Kapp, Elektromechanische Konstruktionen; Arnold, Konstruktionstafeln für den Dynamobau; Krämer, Konstruktion und Berechnung von Dynamo-Gleichstrommaschinen, Schmidt-Ulm, Gleichstrom-Dynamomaschinen und Motoren. Ausserdem verweisen wir für solche, die sich mit der Konstruktion derartiger Maschinen eingehend beschäftigen wollen, noch auf Fischer-Hinnen, Die Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion elektrischer Gleichstrommaschinen, und auf Arnold, Ankerwickelungen und Ankerkonstruktionen.

XXVI. Kapitel.

Gleichstrommaschinen mit offenem Anker.

1. Die Wirkungsweise des Ankers mit offener Wickelung.

Während bei den bisher besprochenen Dynamomaschinen mit geschlossenem Anker sämtliche Ankerwindungen einen oder mehrere jederzeit in sich geschlossene Stromkreise bilden, sind bei den Maschinen mit offener Ankerwickelung diejenigen Spulen, die gerade der geringsten Induktionswirkung ausgesetzt sind, aus dem Stromkreise entweder gänzlich ausgeschaltet oder wenigstens parallel geschaltet. Dadurch wird der innere Widerstand des Ankers verringert, die EMK vergrössert. Während bei Maschinen mit geschlossener Wickelung die Bürsten in der sogenannten neutralen Zone, d. h. an den Stellen angelegt werden, an denen die Induktionswirkung am geringsten ist, liegen bei den Maschinen mit offenem Anker die Bürsten in der Nähe der Stellen an, an welchen die stärkste Induktion stattfindet.

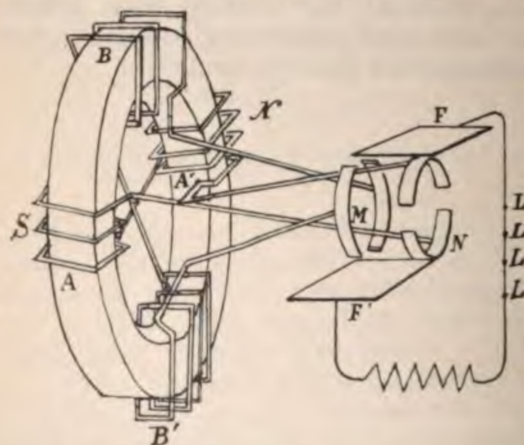


Fig. 323. Offene Ankerwickelung mit zwei Spulenpaaren.

Zwei Spulen AA' (vergl. Fig. 323) sind auf zwei sich diametral gegenüber liegenden Stellen eines Ringankers angebracht und mit den beiden cylindrischen Schalen eines Umschalters N verbunden. Die beiden Spulen sind hintereinander geschaltet, und der in ihnen erzeugte Wechselstrom (vergl. Kap. XIX, Abschn. 2, S. 328) wird durch den Umschalter derart unterbrochen und gewendet, dass aus den mit

dem äusseren Stromkreise verbundenen Bürsten F und F' ein unterbrochener Gleichstrom austritt (vergl. Fig. 324, a).

Bei jeder Umdrehung entstehen in den beiden Spulen A und A' zwei Wellen elektromotorischer Kraft, die ihre Gipfel erreichen, kurz nachdem die Spulen an den Polschuhen der Feldmagnete vorüber gegangen sind. Die induzierte EMK erreicht den Wert Null, wenn die Spulen sich um 90^0 weiter gedreht haben. Ausserdem befindet sich aber auf dem Ankerkern noch ein zweites, ganz gleich beschaffenes Spulenpaar B B', das ebenfalls mit einem solchen Stromabgeber M verbunden ist. Diese Spulen liefern eine zweite Welle EMK, die ihr Maximum gerade dann erreicht, wenn die Induktion in A A' durch Null hindurchgeht und ihr Vorzeichen wechselt.

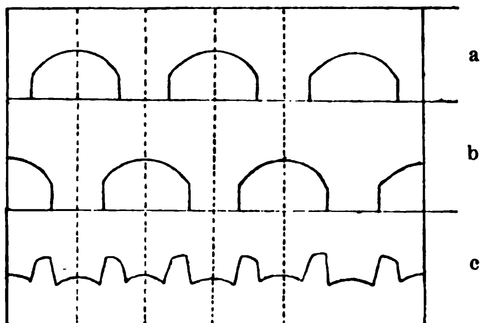


Fig. 324. Spannungskurven am offenen Anker.

Das breite Bürstenpaar F F' greift über die Stromabgeber beider Spulenpaare hinweg. Da die beiden zusammengehörigen Schalen jedes Stromabgebers durch erhebliche Zwischenräume getrennt sind, bleibt jedesmal ein Spulenpaar gänzlich aus dem Stromkreise ausgeschaltet, wenn es sich in der Stellung befindet, in der die in ihm induzierte EMK einen sehr kleinen Wert hat und sich umkehrt. Dann werden durch die breiten Bürsten eine Zeit lang beide Spulenpaare parallel geschaltet.

Bei noch weiterer Drehung des Ringes wird dann das Spulenpaar A' A'' ausgeschaltet und die Spulen B' B'' liefern allein den Strom, während die in ihnen induzierte EMK den grössten Wert überschreitet.

Durch diese Anordnung wird der innere Widerstand der Ankerwickelung verringert, eine teilweise Ausgleichung der Schwankungen der EMK hervorgebracht und eine Verminderung der Funkenbildung erreicht, die sonst eintreten müsste, wenn der Strom thatsächlich unterbrochen würde.

Wie die obenstehende Abbildung (Fig. 324) zeigt, legen sich zwei Reihen von Wellenstücken übereinander; die eine ist in a, die andere in b, jede für sich gezeichnet. Diese Wellenstücke setzen sich zu einer dritten, zahnartig gewellten Linie c durch Addition zusammen. Während der Dauer der Parallelschaltung beider Spulen ist allerdings der Vorgang ziemlich verwickelt, da dann anfänglich

die EMK der einen überwiegt; die EMK des ersten Spulenpaares nimmt ab, die des anderen nimmt gleichzeitig zu. Für einen Augenblick sind dann die EMK gleich, wenn beide Spulenpaare mit den Richtungen der grössten Wirkung gleiche Winkel bilden; hierauf überwiegt die EMK der anderen Spule. Unmittelbar darauf wird das Spulenpaar ausgeschaltet, es ist offen und wird für kurze Zeit stromlos u. s. f.

2. Die Brush-Maschine.

Unter den Maschinen mit offener Ankerwickelung nimmt die Brush-Maschine eine besonders hervorragende Stellung ein. Sie dient vorzugsweise zum Betriebe zahlreicher, hintereinander ge-

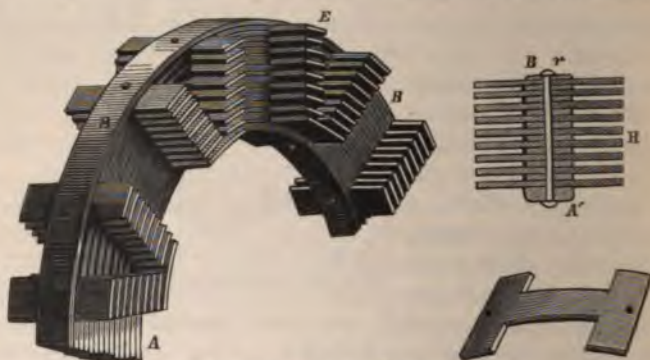


Fig. 325. Eisenteile des Brush-Ankers.

schalteter Bogenlampen mit konstanter Stromstärke. Es ist eine Flachringmaschine mit seitlich gestellten Polen.

Die Einrichtung dieser Maschine entspricht ziemlich genau der, die wir erhalten, wenn wir auf demselben Ankereisen dasselbe Spulensystem, welches wir in Fig. 325 dargestellt haben, noch einmal um 45° gegen das erste System versetzt aufbringen, und dieses zweite System samt Kommutatoren mit dem vorigen, bereits vorhandenen hintereinander schalten. Die Spannung der Maschine wird dadurch auf das Doppelte erhöht, die Spannungsschwankungen werden jedoch geringer.

Bei den Maschinen von **Brush** besteht der Eisenkern des Ringes aus dünnem (1,5 *mm*) Bandeisen B, das auf einer festen Unterlage A spiralförmig aufgewickelt ist. In regelmässigen Abständen werden (vergl. Fig. 325) seitlich hervorragende Stücke H eingeschoben, die beiderseitig wie Zähne über das Eisenband hervorragen. In die durch diese Vorsprünge gebildeten Zwischenräume werden dann die Spulen gewickelt. Durch gut isolierte Bolzen wird das Eisen

zusammengehalten. Die Luft kann in die Zwischenräume des Eisenkernes eindringen und die durch Wirbelströme entwickelte Wärme abführen.

Die Feldmagnete liegen der Ankerachse parallel. Zwei kräftige Polpaare befinden sich rechts und links neben dem Anker; die auf verschiedenen Seiten des Ringankers sich gegenüber liegenden Pole haben gleiche, die auf derselben Seite des Ringes um 180° voneinander abstehenden entgegengesetzte Polarität.

Das nachfolgende Schema (Fig. 326), welches wir einer Darstellung von Silvanus P. Thompson[1]) entnehmen, bezieht sich

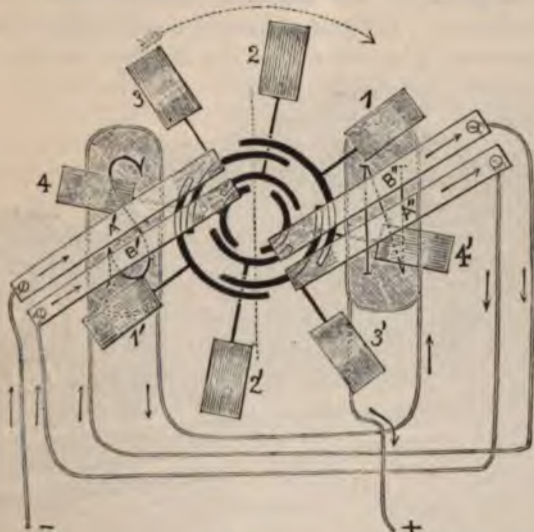


Fig. 326. Schematische Darstellung der Brush-Maschine.

auf eine Brush-Maschine mit vier Spulenpaaren 1,1'; 2,2'; 3,3'; 4,4'. Es sind vier paarweise gruppierte Stromwender vorhanden, die in Wirklichkeit nebeneinander, in der Abbildung aber, der Übersichtlichkeit wegen, in vier konzentrischen Kreisen übereinander angeordnet sind. Das eine Stromwenderpaar ist um 45° gegen das andere verdreht. Die äusseren Enden jedes Spulenpaares sind mit den zugehörigen Schalen ihres Stromwenders verbunden; die inneren Enden der zusammengehörigen Spulen stehen querüber (in der Figur nicht gezeichnet) miteinander in Verbindung.

[1]) Die dynamoelektrischen Maschinen. Deutsch von Grawinkel. Um die Figur vollständig zu verstehen, muss man sich denken, dass die Bürsten A' A" und B' B" schräg gegen die Papierebene stehen und nur mit ihren inneren Enden die Schalen des Stromabgebers berühren.

In jeder der acht verschiedenen Stellungen, die wechseln, wenn der Ring sich um je 45° weiter gedreht hat, ist ein Spulenpaar ausgeschaltet (in der gezeichneten Lage 1,1′); das dazu senkrechte Spulenpaar (in der Figur 3,3′) befindet sich in der Stellung der stärksten Induktion und steht mit den Bürsten A′ A″ in Verbindung. A″ steht durch einen Draht in Verbindung mit B′. Der in B′ eintretende Strom verzweigt sich nun in die Spulen 2,2′ und 4,4′, in welchen ebenfalls eine Induktionswirkung in gleichem Sinne wie in 3,3′ stattfindet. In der Bürste B″ vereinigen sich diese beiden Zweigströme wieder, umfliessen hierauf die Wickelungen der Feldmagnete, gelangen dann zur Maschinenklemme und von da in den äusseren Stromkreis. Bei einer halben Umdrehung des Ankers erfolgen die Aus- und Einschaltungen der Spulen in folgender Weise:

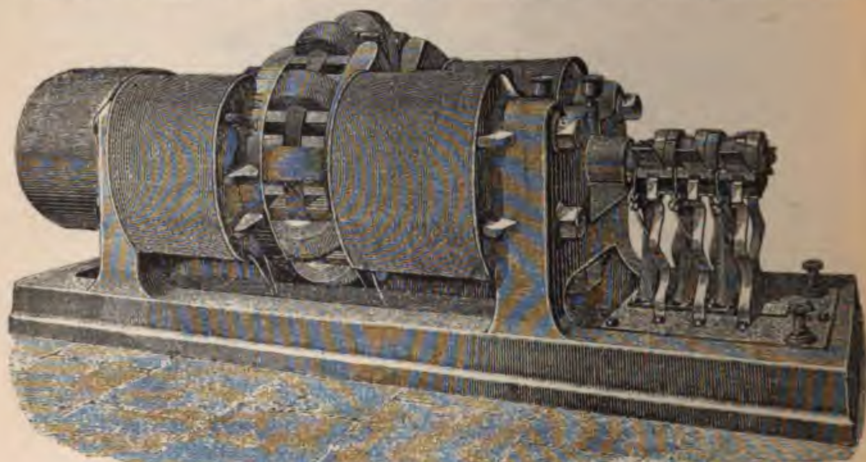


Fig. 327. Brush-Maschine.

	Ausgeschaltet	Eingeschaltet
I.)	1,1′	$A' - 3{,}3' - A'' - B' \left\langle \begin{matrix} 4{,}4' \\ 2{,}2' \end{matrix} \right\rangle B'' -$ Feldmagnete $\left\{ \begin{matrix} \text{äusserer} \\ \text{Widerst. } A' \end{matrix} \right.$
II.)	2,2′	$A' \left\langle \begin{matrix} 1'{,}1 \\ 3{,}3' \end{matrix} \right\rangle A'' - B' - 4{,}4' - B'' -$ Feldmagnete $\left\{ \begin{matrix} \text{äusserer} \\ \text{Widerst. } A' \end{matrix} \right.$
III.)	3,3′	$A' - 1'{,}1 - A'' - B' \left\langle \begin{matrix} 4{,}4' \\ 2{,}2' \end{matrix} \right\rangle B'' -$ Feldmagnete $\left\{ \begin{matrix} \text{äusserer} \\ \text{Widerst. } A' \end{matrix} \right.$
IV.)	4,4′	$A' \left\langle \begin{matrix} 3'{,}3 \\ 1{,}1' \end{matrix} \right\rangle A'' - B' - 2'{,}2 - B'' -$ Feldmagnete $\left\{ \begin{matrix} \text{äusserer} \\ \text{Widerst. } A' \end{matrix} \right.$
V.)	1,1′	$A' - 3'{,}3 - A'' \left\langle \begin{matrix} 2'{,}2 \\ 4'{,}4 \end{matrix} \right\rangle B'' -$ Feldmagnete · · $\left\{ \begin{matrix} \text{äusserer} \\ \text{Widerst. } A' \end{matrix} \right.$

u. s. f.

Die äussere Erscheinung der Brush-Maschinen ist in der vorstehenden Abbildung (Fig. 327) dargestellt.

Mit der Maschine ist ein selbstthätiger Regulator verbunden, der durch die Wickelung der Feldmagnete einen stärkeren Strom fliessen macht, wenn die Stromstärke abnimmt, oder durch die Wickelung der Feldmagnete einen schwächeren Strom gehen lässt und die Magnete weniger stark erregt, wenn der Strom zunimmt.

3. Die Maschine von Thomson-Houston.

Auch diese Maschine hat einen Anker mit offener Wickelung und ist, wie die Brush-Maschine, vorzugsweise dazu bestimmt eine grössere Zahl hintereinander geschalteter Bogen- und Glühlampen bei unveränderlicher Stromstärke zu speisen.

Der Anker ist ein kugelförmiger Knäul, der aus nur drei, um je 120° gegeneinander geneigten Spulen besteht, die auf einen länglichen Kern gewickelt sind. Die einen Enden der drei Spulen sind miteinander verbunden; die anderen Enden der Spulen sind zu drei Schalen eines Stromabgebers geführt. Die Kerne der Feldmagnete haben die in nebenstehender Figur 328 dargestellte Gestalt. Zwei durchbohrte Hohlcylinder werden von einem Gestelle F getragen, in dem sich auch die Lager für die Ankerwelle X befinden. Als Polstücke dienen zwei hohlkugelförmige Endflächen, die in der Mitte eine Öffnung haben, um durch Luftwechsel die Abkühlung des Ankers zu begünstigen. Die Wickelung C C′ der Feldmagnete liegt in einem cylindrischen Hohlraume, der durch Flanschen gebildet wird, die an die gusseisernen Elektromagnetkerne angegossen sind. Nach Vollendung der Wickelung der Feldmagnete werden die äusseren, etwas höheren Flanschen der Elektromagnetkerne durch eine grössere Zahl schmiedeeiserner Stäbe miteinander verbunden. Diese Stäbe b b dienen als Joch der Elektromagnete. Die von der Wickelung erzeugten magnetischen Kraftlinien schliessen sich einerseits durch den Anker, anderseits durch diese Stäbe.

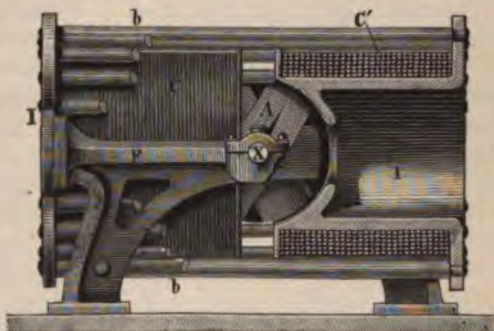


Fig. 328. Maschine von Thomson-Houston.

Wenn der Anker in dem von den Endflächen der Elektromagnete gebildeten kugelförmigen Hohlraume umläuft, entstehen in jeder Wickelung derselben bei jeder vollständigen Umdrehung zweimal elektromotorische Kräfte von entgegengesetzter Richtung.

Die Fig. 329 zeigt die Hauptverbindungen der Thomson-Houston-Maschinen, und zwar sind A, B, C die drei durch isolierende Zwischenmittel voneinander getrennten Schalen des Stromabgebers; mit a, b, c sind schematisch die drei Spulen des Ankers angedeutet. Die rechts und links gezeichneten Solenoide stellen die Wickelungen der Feldmagnete dar, während L, L, L Bogenlampen im äusseren Stromkreise andeuten.

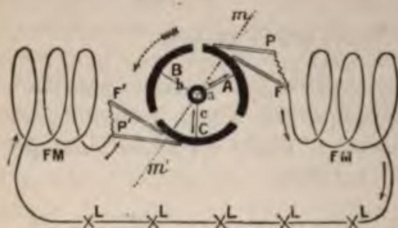


Fig. 329. Schaltung der Thomson-Houston-Maschine.

In Wirklichkeit hat die Maschine, wie die Figur uns zeigt, zwei Bürstenpaare. Wir betrachten zunächst aber, der Einfachheit wegen, den Stromlauf während eines Drittels eines ganzen Umlaufes unter der Voraussetzung, dass nur ein Bürstenpaar P P′ vorhanden wäre. In der Fig. 330a bezeichnet m m′ die Linie der stärksten Induktionswirkung, senkrecht dazu liegt die neutrale Zone n n.

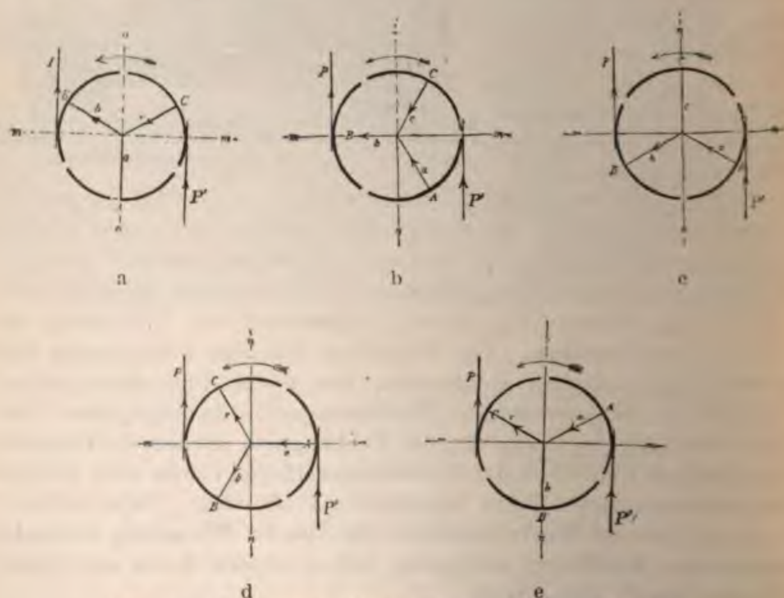


Fig. 330. Der Stromlauf in der Thomson-Houston-Maschine.

In Fig. 330a geht die Spule a durch die neutrale Zone und ist gänzlich ausgeschaltet. Die Spulen b und c sind hintereinander geschaltet. Der Stromlauf findet in folgendem Wechsel statt:

Am Anfange, Fig. 330a, P′ — Spule c — Spule b — P — äusserer Widerstand — Feldmagnete — P′, a ausgeschaltet;

nach $^1/_{12}$ Umdrehung, Fig. 330b P′ — $\left\langle\begin{matrix}\text{Spule a}\\ \text{Spule c}\end{matrix}\right\rangle$ Spule b — P, äusserer Widerstand — Feldmagnete — P′;

nach $^2/_{12}$ Umdrehung, Fig. 330c, P′ — Spule a — Spule b — P — äusserer Widerstand — Feldmagnete — P′, c ausgeschaltet;

nach $^3/_{12}$ Umdrehung, Fig. 330d, P′ — Spule a $\left\langle\begin{matrix}\text{Spule b}\\ \text{Spule c}\end{matrix}\right\rangle$ P — äusserer Widerstand — Feldmagnete — P′;

nach $^4/_{12}$ Umdrehung, Fig. 330e, P′ — Spule a — Spule c — P — äusserer Widerstand — Feldmagnete — P′, b ausgeschaltet.

Nunmehr befindet sich b genau in der Lage wie bei Ausgang der Betrachtung die Spule a. Durch einfache Buchstabenvertauschung findet man daher den Stromlauf in den übrigen beiden Dritteln des Umlaufes.

Man ersieht: 1. Bei jeder ganzen Umdrehung wird jede Spule zweimal während eines Weges von 60° ganz aus dem Stromkreise ausgeschaltet. 2. Stets sind zwei der drei Spulen mit dem äusseren Widerstand und den Feldmagneten hintereinander geschaltet. 3. Einen Augenblick zuvor, ehe sich eine Spule gänzlich ausschaltet, wird sie der Spule, die im Begriff steht, sie zu ersetzen, parallel geschaltet. Dieses parallel geschaltete Paar befindet sich dann zur dritten Spule in Hintereinanderschaltung. Um die ausgeschalteten Spulen nicht während eines ganzen Drittels ihres Weges unthätig zu lassen, wenden Thomson-Houston noch ein zweites Bürstenpaar b b′ an, welches gegen das andere unter einem veränderlichen Winkel (durchschnittlich 60°) geneigt ist. Die auf derselben Seite des Kollektors befindlichen Bürsten sind leitend miteinander verbunden (vergl. Fig. 331). Dadurch wird der Zeitraum, während dessen zwei Spulen parallel geschaltet sind, erheblich verlängert.

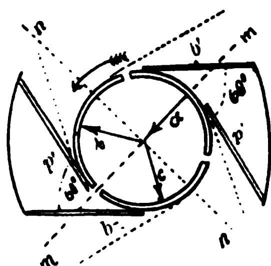


Fig. 331. Die Hilfsbürsten der Thomson-Houston-Maschine.

Ausserdem aber dient das zweite Bürstenpaar auch dazu, die mittlere Stromstärke unveränderlich zu halten, wenn Lampen ein- oder ausgeschaltet werden, oder die den Antrieb besorgende Maschine rascher oder langsamer geht. Durch Verschiebung der Bürsten wird alsdann die E M K der Maschine in der erforderlichen Weise verändert.

Sind bei normalem Betriebe die beiden miteinander verbundenen Bürsten unter einem Winkel von 60° gegeneinander geneigt, sodass sie gleich weit von der Stelle grösster Induktion abstehen, so wird gar keine Spule mehr völlig ausgeschaltet; man hat daher immer zwei parallel geschaltete Spulen, die mit der dritten sich in Hintereinanderschaltung befinden.

Werden Lampen ausgeschaltet, so würde nunmehr die EMK der Maschine zu gross und deshalb der Strom zu stark werden. Alsdann werden selbstthätig die mit p_1 b_1 bezeichneten Bürsten etwas zurückgezogen, die Bürsten p_2 b_2 um einen dreimal grösseren Winkel in der Drehrichtung vorgeschoben (vergl. die gestrichelten Linien in Fig. 331). Dadurch wird der Zeitraum verkürzt, während dessen die der stärksten Induktion ausgesetzten Spulen ihren Strom nach aussen abgeben. Ausserdem tritt die Parallelschaltung der am stärksten induzierten Spulen mit einer nur schwächerer Induktionswirkung ausgesetzten Spule früher ein. Beides bewirkt eine Verminderung der EMK.

Wenn der Strom zu schwach wird, werden die Bürstenpaare selbstthätig näher zusammengerückt; dadurch wird die Zeit, während deren die hauptsächlich wirksamen Spulen den weniger wirksamen parallel geschaltet werden, abgekürzt. Dies bewirkt ein Ansteigen der EMK der Maschine.

Die selbstthätige Verschiebung der Bürsten erfolgt durch die Wirkung eines am Maschinengestell befestigten Elektromagneten R, dessen Wickelung vom Maschinenstrome durchflossen wird. Der Kern M (vgl. Fig. 332) zieht den Anker N an und bewegt dadurch ein Hebelsystem, welches die Drehung der Bürstenträger Y Y und Y^2 Y^2 bewirkt. Wegen der ungleichen Länge der Hebelarme erfolgt die Drehung der Bürsten um verschieden grosse Winkel. Die Kataraktpumpe J, U, A' verhütet Schwingungen des Hebels.

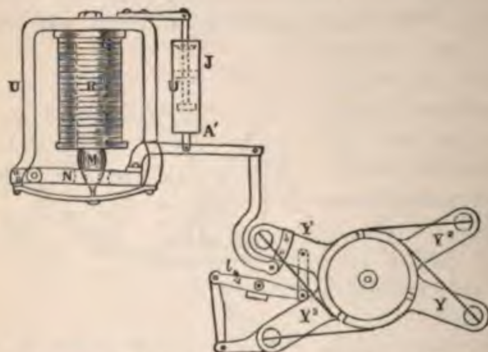


Fig. 332. Regulator der Thomson-Houston-Maschine.

Da diese Maschinen für sehr hohe Spannungen (2000 V und mehr) gebaut werden, entstehen an dem dreiteiligen Stromabgeber jedesmal Lichtbogen, wenn die hintere der zwei zusammengehörigen

Bürsten eine Kollektorabteilung verlässt. Um zu verhüten, dass durch diese Lichtbogen der Kollektor beschädigt wird, ist hinter dem Kollektor ein kleines Gebläse angebracht; dieses sendet jedesmal in dem Augenblick, in dem die Bürste eine Kollektorabteilung verlässt, genau gegen die Stelle, an der ein Lichtbogen entsteht, einen kräftigen Luftstrom, der den Lichtbogen sofort wieder ausbläst.

4. Vorzüge und Nachteile der Maschinen mit offener Ankerwickelung.

Für die Erzeugung von Strömen geringerer Stärke mit sehr hoher Spannung, wie solche für den Betrieb zahlreicher, hintereinander geschalteter Bogen- oder Glühlampen erforderlich sind, haben sich die Maschinen mit offener Ankerwickelung besonders gut bewährt. Für Spannungen über 3000 V sind Gleichstrommaschinen mit geschlossenem Anker nicht gut brauchbar, da die isolierenden Zwischenräume zwischen den Kollektorsegmenten bei sehr hohen Spannungen leicht durch Lichtbögen überbrückt werden. Dadurch würde aber die Maschine kurz geschlossen und der Kollektor zerstört werden.

Obgleich die Brush- und auch die Thomson-Houston-Maschinen nunmehr bereits zu den älteren Maschinenformen gehören, werden in Amerika noch immer viele Bogenlampen von solchen Maschinen mit Strom versorgt. Dies hat darin seinen Grund, dass Beleuchtungseinrichtungen mit hintereinander geschalteten Lampen in Anlage und Betrieb besonders billig sind und dass Maschinen mit offenem Anker sich leichter auf eine unveränderliche, mittlere Stromstärke selbstthätig regeln lassen als Maschinen mit geschlossener Ankerwickelung Allerdings ist, wie ein Blick auf die Fig. 324 zeigt, die Stromstärke rasch aufeinander folgenden periodischen Schwankungen unterworfen. Bei einer Thomson-Houston-Maschine, die bei einer Umdrehungszahl von 850 im Mittel mit 6,8 A bei 2000 V arbeitete, schwankt z. B. die Stromstärke bei jeder vollen Umdrehung sechsmal zwischen 5 und 8 A.

Für das Auge sind zwar so rasch sich folgende, den Änderungen der Stromstärke entsprechende Schwankungen des Helligkeitsgrades der Lampen durchaus nicht wahrnehmbar; in Telephonleitungen aber, die in der Nähe von Drähten verlaufen, die von derartigen Strömen durchflossen sind, treten starke Induktionserscheinungen auf. Auch die Gefahr, welche der Gebrauch so hoher Spannungen mit sich bringt, darf nicht unterschätzt werden.

XXVII. Kapitel.

Die galvanischen Elemente.

1. Welchen Bedingungen soll ein Element genügen?

Obgleich für die Starkstrom-Elektrotechnik die galvanischen Elemente nur von geringer Bedeutung sind, giebt es doch einige Fälle, in denen man fast ausschliesslich Elemente als Stromquelle benutzt, nämlich dann, wenn man mit geringen Anschaffungskosten eine für nur gelegentliche Verwendung stets bereite Stromquelle zur Verfügung haben will. Unter der grossen Zahl von Vorschlägen, die für die Anwendung galvanischer Zellen gemacht worden sind, haben nur wenige dauernd eine weitere Verbreitung gefunden; es sind dies diejenigen, die sich durch die Vereinigung vieler guter Eigenschaften besonders auszeichnen.

Zunächst soll die EMK des Elementes möglichst gross und die unvermeidliche Verminderung derselben durch die Polarisation möglichst gering sein (konstante Elemente). Nach dem Gebrauche soll sich die EMK thunlichst von selbst oder durch die Anwendung geeigneter einfacher Hilfsmittel auf einen möglichst hohen Stand zurückbringen lassen (regenerierbare Elemente).

Der innere Widerstand muss möglichst klein sein.

Nur während das Element in Thätigkeit ist, soll ein Verbrauch der einzelnen Bestandteile, besonders des Zinks, stattfinden.

Eine Forderung der Hygiene, Annehmlichkeit und Bequemlichkeit ist es, dass die Zellen weder giftige, noch unangenehm wirkende Gase entwickeln, und dass die Flüssigkeiten, welche verwendet werden, nicht stark giftig sind oder Flecken verursachen.

Ein Element, das allen diesen Ansprüchen gleichzeitig genügt, giebt es nicht. Jede Art von Zellen zeigt gewisse Nachteile, und das ist der Grund, warum die Zahl von Fällen, in welchen stärkere Ströme durch Elemente erzeugt werden, immer mehr abnimmt.

Selbstverständlich spielt auch der hohe Preis der durch Elemente erzeugten elektrischen Energie eine erhebliche Rolle (vergl. Abschn. 9 dieses Kap., S. 534).

2. Der Ursprung der elektrischen Energie im Elemente und die Polarisation.

Bezeichnen wir den an der Berührungsstelle zweier verschiedener Körper A und B beobachteten Potentialsprung mit A|B, so kann die gesamte Leistung L eines aus den Metallen M_1 und M_2 und den Flüssigkeiten F_1 und F_2 bestehenden Elementes dargestellt werden durch die Gleichung:

$$L = J \cdot M_1 \mid F_1 + J \cdot F_1 \mid F_2 + J \cdot F_2 \mid M_2 + J \cdot M_2 \mid M_1.$$

Wir wissen nun (vergl. Kap. IV, Abschn. 10, S. 98), dass $M_2 \mid M_1$ gleich Null und $F_1 \mid F_2$ im allgemeinen sehr klein ist. Die Leistung des Elementes rührt also nahezu ausschliesslich von den chemischen und physikalischen Prozessen her, die sich an den Berührungsstellen der Metalle und der Flüssigkeiten vollziehen. Der wichtigste Vorgang ist die Auflösung des Metalles, das den negativen Pol des galvanischen Elementes bildet, also des Zinks, infolge seiner hohen Lösungstension (vergl. S. 98 und S. 99).

Von Bedeutung sind aber auch die an dem den positiven Pol des Elementes bildenden Metalle auftretenden Trennungen chemischer Verbindungen, die mit Verbrauch von Energie verknüpft sind.

Obgleich wir schon im IV. Kapitel von Polarisation gesprochen haben, müssen wir uns hier nochmals ausführlicher mit diesem Gegenstande beschäftigen. Wenn wir ein Daniellelement mit einem Wasserzersetzungsapparate verbinden und in den Stromkreis ein Galvanometer einschalten, so entsteht doch ein Strom, obgleich die EMK dieses Elementes wenig mehr als 1 Volt beträgt, während die EMK zwischen Wasserstoff und Sauerstoff, die sich zu verbinden streben, gleich 1,47[1]) ist. Dieser Strom nimmt aber sehr rasch ab und wird nach kurzer Zeit fast Null. Dass wirklich die im Wasserzersetzungsapparate auftretende Polarisation die Ursache des Verschwindens des Stromes ist, erkennt man daraus, dass, wenn man rasch das Daniellelement ausschaltet und den Stromkreis wieder schliesst, nunmehr für kurze Zeit ein entgegengesetzt gerichteter Strom durch das Galvanometer fliesst.

Die Ursache dieser Vorgänge ist die Anwesenheit von gelöstem Sauerstoff in der Voltameterflüssigkeit. Die ersten Mengen von elektrolytisch ausgeschiedenem Wasserstoff verbinden sich mit diesem Sauerstoff, und erst wenn der an der Oberfläche oder in der Nähe der negativen Elektrode befindliche Sauerstoff verbraucht ist, kommt die Polarisation zur Wirkung.

---

[1]) S. 95, 1. Beispiel.

Die EMK der Polarisation hängt in erster Linie von der Verbindungswärme der Substanz ab, welche als Elektrolyt in der Zelle zersetzt wird, dann aber auch von der Natur der Elektroden und von der Dichte des Stromes (d. i. die Stromstärke auf die Oberflächeneinheit der Elektroden). Zwischen blanken Platindrähten in ungesäuertem Wasser erreicht die Polarisation Werte von 2 Volt bis 2,3 Volt; verwendet man mit Platinschwamm überzogene Elektroden, so steigt die Polarisation nicht über 1,8 Volt. Wenn zwei metallische Punkte als Elektroden verwendet werden, geht die Polarisation bis zu 3,3 Volt hinauf. Je nach der Beschaffenheit der Elektroden und der Dichte des Stromes entstehen etwas abweichende Zersetzungsprodukte (z. B. Wasserstoffsuperoxyd). Die Vergrösserung der Oberfläche der Elektroden, an der die Gasentwickelung stattfindet, bewirkt immer eine Verminderung der Polarisation.

Folge der grösseren oder geringeren Polarisation ist es auch, dass die EMK und der innere Widerstand eines Elementes keine konstanten Grössen, sondern mit der Stromstärke und mit der Dauer des Stromes veränderlich sind.

Wenn man nun ein Element durch einen Leitungsdraht schliesst, so wird infolge des chemischen Vorganges, der vorzugsweise in der Lösung des Zinkes besteht, eine EMK und somit ein Strom hervorgerufen. Sowie der Strom zu fliessen beginnt, wird das Element selbst zur Zersetzungszelle. Das Metall (das Zink), welches den negativen Pol des Elementes bildet, ist die Anode dieser Zersetzungszelle; an ihm scheidet sich Sauerstoff aus. An dem positiven Pole des Elementes (Kupfer, Platin oder Kohle) wird Wasserstoff ausgeschieden. Der elektrolytisch entwickelte Sauerstoff wirkt wesentlich stärker auf das Zink oxydierend ein, als gewöhnlicher Sauerstoff; er wird bei dieser Oxydation verbraucht und wird daher in einem Element nur in geringem Masse und nur bei massenhafter Entwickelung durch sehr hohe Stromstärken polarisierend zu wirken imstande sein.

Es wird sich also, wenn man der Polarisation entgegenwirken will, vorzugsweise darum handeln, den Wasserstoff zu beseitigen, der sich an der Substanz, die den positiven Pol des Elementes bildet, an dem Kupfer, dem Platin, der Kohle ausscheidet. Wie wir soeben erwähnt haben, kann man durch Vergrösserung der Oberfläche dieses Bestandteiles oder durch Erschütterung und Bewegung dieser Elektrode und der erregenden Flüssigkeit auf mechanischem Wege den nachteiligen Einfluss der Wasserstoffausscheidung wenigstens verringern, wenn auch nicht vollständig beseitigen.

Es lag daher nahe, daran zu denken, diese Wasserstoffausscheidung auf chemischem Wege zu beseitigen; Mittel, welche in diesem Sinne wirken, nennt man depolarisierende.

3. Die Stoffe, welche in galvanischen Elementen verwendet werden.

Als oxydables und auflösbares Metall wird fast ausschliesslich Zink benutzt, obgleich es ein ziemlich kostbarer Stoff ist. Man hat zwar versucht Zink durch billigere Metalle, z. B. Eisen, zu ersetzen, man erhält aber für gleiches Gewicht eine verhältnismässig geringere Menge elektrischer Energie, als dem niedrigeren Preise entspricht. Auch durch das noch oxydablere Magnesium hat man Zink zu ersetzen gesucht; der Gewinn an EMK wurde aber durch geringere Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten aufgewogen, die man dann verwenden muss, sodass dem wesentlich höheren Preise und der geringeren Haltbarkeit des Magnesiums kein angemessener Vorteil entsprach. Immerhin brauchen Versuche nach dieser Richtung noch nicht als abgeschlossen betrachtet zu werden.

Chemisch reines Zink wird von reiner verdünnter Schwefelsäure äusserst wenig angegriffen, wenn es nicht von einem minder oxydabelen Metall in der Flüssigkeit berührt wird.[1]) Käufliches Zink enthält aber stets Eisen und Kohle, die zur Ausscheidung der Wasserstoffionen und damit zur Entstehung lokaler Ströme Anlass geben. Man kann diese lokalen Ströme dadurch vermeiden, dass man die Oberfläche des Zinks mit Quecksilber überzieht, das Zink amalgamiert.

Dieses Amalgamieren geschieht zumeist dadurch, dass man das Zink in eine angesäuerte Lösung von salpetersaurem Quecksilber eintaucht und gleichzeitig metallisches Quecksilber mit einem Kork auf der Oberfläche des Zinks verreibt. Ein anderes Verfahren besteht darin, dass man 96 Teile Zink mit 4 Teilen Quecksilber in geschlossenen Eisengefässen zusammenschmilzt und aus der so erhaltenen Legierung die Zinkelektroden formt.

Als positiven Pol eines Elementes wählt man am besten einen Elektrizitätsleiter, der von den chemischen Prozessen, die sich in der Flüssigkeit und an dem Pole vollziehen, in keiner Weise angegriffen wird. Da diese Elektrode gleichzeitig eine möglichst grosse Oberfläche besitzen soll, sind besonders aus künstlicher Kohle gepresste Platten oder Cylinder, oder mit Platinschwamm überzogene Platten geeignet.

Ebensogut kann man dünne, gewellte Platinstreifen oder andere Metalle verwenden, die auf galvanischem Wege mit einer Platinschicht überzogen sind.

---

[1]) Vergl. S. 98.

Als Flüssigkeit, die dazu dienen soll, das Zink aufzulösen, benutzt man zumeist reine, verdünnte Schwefelsäure (Dichte 1,15)[1]) oder auch verdünnte Salzsäure. Als depolarisierende Substanz, womit man den Körper umgiebt, der den positiven Pol eines Elementes bildet, kann jeder Stoff dienen, der imstande ist, den durch die Elektrolyse entstehenden Wasserstoff zu binden. Ganz besonders eignen sich zu diesem Zwecke Körper, die reich an Sauerstoff oder Chlor und geneigt sind, diese Stoffe abzugeben. Hierher gehören z. B. Mangansuperoxyd (Braunstein), Bleisuperoxyd, Kupferoxyd, Salpetersäure, Chromsäure, Chlorwasser, Königswasser, Chlorsilber und Kupfersulfat. Für Elemente mit hoher EMK wählt man Salpetersäure oder Chromsäure, oder auch Bleisuperoxyd, deren Zersetzung nur einen geringfügigen Aufwand an Energie beansprucht. Salpetersäure, Königswasser, Chlorwasser entwickeln schädliche Dämpfe, vor deren Einwirkung man sich nur schwer schützen kann.

Einige von diesen depolarisierenden Substanzen, wie z. B. Braunstein, Bleisuperoxyd, Kupferasche, Chlorsilber sind fest. Dies beeinträchtigt allerdings ihre Wirksamkeit, macht es aber möglich nur eine Flüssigkeit zu benutzen. Dadurch wird die Unterhaltung des Elementes erleichtert, und solche Zellen sind besonders geeignet für gelegentlichen kurzdauernden Gebrauch mit längeren dazwischenliegenden Pausen.

Benutzt man flüssige depolarisierende Substanzen, so muss man dieselben zumeist durch poröse Thonzellen von der das Zink lösenden Flüssigkeit trennen, weil sie das Zink auflösen würden, auch wenn kein Strom vom Elemente erzeugt wird. Solche Thonzellen haben den Nachteil, dass sie den inneren Widerstand nicht unerheblich vergrössern, da der Strom nur durch die kapillaren Zwischenräume hindurch von einer Flüssigkeit zur anderen gelangen kann.

Bei einigen Elementen dient ein poröser, aus künstlicher Kohle hergestellter Cylinder gleichzeitig als positiver Pol und poröse Scheidewand; in das Innere dieser Kohle bringt man die depolarisierend wirkende Flüssigkeit.

Gelegentlich wird auch statt der Thonzelle ein Sack aus Pergamentpapier oder Kollodium benutzt.

Für Zellen, die nicht von ihrem Standorte entfernt zu werden brauchen, kann man auch die beiden Flüssigkeiten infolge ihrer verschiedenen Dichte ohne Zwischenschicht übereinander ausbreiten. Es ist dies aber nur dann angängig, wenn das spezifische Gewicht der beiden Flüssigkeiten verschieden ist und diese Flüssig-

[1]) Arsenhaltige, verdünnte Schwefelsäure greift auch amalgamiertes Zink an.

keiten nicht die Neigung haben, sich durch Diffusion rasch zu vermengen oder gar sich miteinander zu verbinden.

Für Zellen, die vielfach transportiert werden sollen, tränkt man Schwamm, Sand, amorphe Kieselsäure, Gips, Gelatine oder Kieselgallert, die man aus Wasserglas herstellt, mit den Flüssigkeiten. Solche Elemente nennt man dann Trockenelemente. Zumeist werden solche Zellen oben durch eine Wachs- oder Asphaltschicht vollständig verschlossen; dadurch wird allerdings die Verdampfung ganz vermieden, gleichzeitig wird aber die Aufnahme depolarisierend wirkenden Sauerstoffes aus der Luft verhindert.

Wenn Zellen, die für längeren Gebrauch bestimmt sind, die Neigung haben, an der Gefässwand oberhalb der Flüssigkeit Krystalle ausblühen zu lassen, so muss der obere Rand des Gefässes mit Paraffin, Lack oder einer anderen Substanz überzogen werden, die von der Flüssigkeit nicht benetzt wird.

Greift die Flüssigkeit das Zink an, auch wenn kein Strom vom Element erzeugt wird, so müssen Einrichtungen getroffen werden, dass dieses Metall nur während des Gebrauches eintaucht. (Tauchelemente.)

4. Elemente, bei welchen der Sauerstoff der Luft depolarisierend wirkt.

Die Thatsache, dass die meisten Säure- und Salzlösungen die Eigenschaft haben, Sauerstoff aus der Luft zu absorbieren, wird bei vielen Elementen benutzt; ja, man kann sogar sagen, dass dieser Umstand bei einer grösseren Zahl von galvanischen Zellen es überhaupt erst möglich macht, dass ein dauernder Strom entsteht. Je mehr von dem in der Flüssigkeit gelösten Sauerstoff von dem elektrolytisch ausgeschiedenen Wasserstoff zur Wasserbildung verbraucht wird, destomehr muss die EMK des Elementes sinken. Es ist ohne weiteres verständlich, dass dieser Abfall der EMK sich umso rascher vollziehen muss, je stärker der Strom ist, und dass in dem Masse, als neuer Sauerstoff aus der Luft wieder in die Flüssigkeit eintritt, die Gegenwirkung der Polarisation allmählich wieder verschwinden muss.

Bewegung der Flüssigkeit oder der Elektrode wird daher eine doppelte Wirkung haben. Einmal wird sie die mechanische Ablösung der Wasserstoffbläschen begünstigen und sie in der Flüssigkeit verteilen, soweit sie nicht aufsteigen und entweichen, und ausserdem wird sie die Aufnahme neuen Sauerstoffs aus der Luft begünstigen. (Cirkulationselemente.)

Alle Mittel, welche geeignet sind, die Menge des in der Flüssigkeit verfügbaren Sauerstoffs zu erhöhen, wirken daher insofern

günstig, als sie den Eintritt der nachteiligen Wirkungen der Polarisation verzögern. Man wählt daher als positive Elektroden gern poröse Kohle, in deren Hohlräumen und auf deren grosser Oberfläche sich beträchtliche Mengen von Sauerstoff verdichten; durch den aus der Flüssigkeit herausragenden Teil dieser Kohlen wird fortdauernd neuer Sauerstoff in die Flüssigkeit eingeführt. Es ist daher unzweckmässig, den ganzen aus der Flüssigkeit herausragenden Teil der Kohle mit Paraffin zu tränken, wie dies vielfach geschieht. Das Überziehen des positiven Poles der galvanischen Zellen mit Platinschwamm ist ebenfalls sehr vorteilhaft, da diese Substanz bekanntlich sehr grosse Mengen von Gasen in ihren Poren zu verdichten imstande ist. Ebenso ist die Füllung der Elemente mit Gartenerde oder ähnlichen Stoffen, denen man die erregende Flüssigkeit beigemengt hat, vorteilhaft, obschon sie die Zirkulation der Flüssigkeit erschweren, weil in diesen Stoffen grosse Mengen von Luft eingeschlossen sind.

Zu den Elementen, in welchen die depolarisierende Wirkung der Luft benutzt wird, gehören streng genommen alle alten Voltaelemente, die aus Zink und Kupfer in verdünnter Schwefelsäure bestehen. Da diese aber praktisch nicht mehr verwendet werden, brauchen dieselben hier nicht weiter in Betracht gezogen zu werden. Wir beschreiben hier nur kurz



Fig. 333. Das Maiche-Element.

das Maiche-Element (1879).

Dieses Element besitzt viele der soeben erwähnten Vorteile und erfreut sich daher noch heute, zumal in Frankreich, einer vielfachen Anwendung für die Telegraphie. In einem Glasbecher (vergl. Fig. 333) hängt von oben herab, an einem Hartgummideckel befestigt und durch einen Platindraht mit der Klemme verbunden, eine mit Platinschwamm überzogene Kohle oder platinierte Kohlenstücke, die in einem siebartigen Porzellangefässe ruhen. Ausserdem trägt ein am Deckel befestigter Hartgummistab eine kleine Porzellanschüssel, in der sich Zinkstücke und Quecksilber befinden. Ein Platindraht, der, soweit er sich mit der Flüssigkeit in Berührung befindet, mit einer isolierenden Hülle umgeben ist, verbindet das Quecksilber mit der anderen Polklemme des Elementes. Als Erregerflüssigkeit dienen für Elemente von 20 *cm* Höhe und 14 *cm* Weite wässerige Lösungen

von 250 *g* Salmiak oder 150 *g* Natriumbisulfat oder auch Wasser mit 5 bis 10% englischer Schwefelsäure. Das Gefäss soll nur so hoch mit der Flüssigkeit gefüllt werden, dass gerade die Kohle eintaucht, der grösste Teil der Kohle aber in die Luft hinausragt. — Die Zinksalze, die durch Lösung des Zinks entstehen, sammeln sich vorzugsweise auf dem Boden des Gefässes. Die EMK beträgt anfänglich 1,25 Volt, der innere Widerstand bei Zellen von 20 *cm* Höhe nur $^1/_2$ bis 1 ω.

5. Elemente mit einer Flüssigkeit und einem depolarisierend wirkenden Metalloxyd.

Die wichtigste und weitverbreitetste Zelle dieser Gruppe ist unzweifelhaft

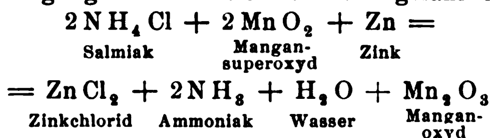
a) Das Leclanché-Element (1867).

Die nebenstehende Fig. 334 zeigt die ältere Form, die noch heute vielfach in Gebrauch ist. In einem Glasgefässe, dem man, der besseren Raumausnutzung bei der Aufstellung wegen, eine rechteckige Form giebt, taucht in eine gesättigte Lösung von Salmiak einerseits ein Zinkstab, anderseits eine mit Löchern versehene Thonzelle, in der sich eine Kohlenplatte befindet, die mit einem grobkörnigen Gemisch von Pyrolusit (Braunstein, Mangansuperoxyd) und kleinen Stücken von Graphit oder Retortenkohle umgeben ist. Damit die Braunsteinstücke nicht aus dem Thongefässe herausfallen können, ist der oberste Teil der Thonzelle zumeist bis auf eine kleine Öffnung, die den Austritt entweichender Gase und den Zutritt der Luft gestattet, mit Harz oder auf andere Weise geschlossen.



Fig. 334. Ältere Form des Leclanché-Elementes.

Das Zink wird unter Bildung von Chlorzink vom Salmiak gelöst, in grösseren Mengen aber nur, wenn ein Strom durch das Element fliesst; das Ammoniak wird frei. Der an der Oberfläche der Kohle entstehende Wasserstoff reduziert das Mangansuperoxyd. Der normale Vorgang vollzieht sich somit ungefähr nach folgender Formel:



$$\underset{\text{Salmiak}}{2\,NH_4Cl} + \underset{\text{Mangan-superoxyd}}{2\,MnO_2} + \underset{\text{Zink}}{Zn} =$$

$$= \underset{\text{Zinkchlorid}}{ZnCl_2} + \underset{\text{Ammoniak}}{2\,NH_3} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O} + \underset{\text{Manganoxyd}}{Mn_2O_3}$$

Durch sekundäre Wirkungen bildet sich jedoch ausserdem noch Zinkoxychlorid, ein Chlorzink-Chlorammoniumdoppelsalz und salpetersaures Ammoniak. Neuerdings hat man vielfach künstliche Elektroden dadurch hergestellt, dass man 40 Teile Pyrolusit und 44 Teile Graphit mit 10 Teilen Teer und einigen anderen Bindemitteln in Metallformen zu Hohlcylindern, Platten oder in sonst geeignete Formen presst und allmählich bis auf 350° C. erhitzt. Die poröse oder durchlochte Thonzelle kommt bei solchen Elementen in Wegfall. Der Zinkstab wird dann durch Gummiringe gegen ein Porzellanplättchen gepresst, welches ihn von der Kohle isoliert (vergl. Fig. 335).



Fig. 335. Neuere Form des Leclanché-Elementes.

Neuere Formen des Leclanché-Elementes[1]) sind die von Wolff, das Standkohlenelement von C. Erfurth in Berlin. Auch die unter den Namen Thor-Element, Helioselement in den Handel gebrachten Zellen und das Atlantic-Element von Friedländer & Co. in Berlin gehören in diese Gruppe.

Auch Trockenelemente dieser Art hat man hergestellt, indem man der Salmiaklösung gallertartige Kieselsäure, Gelatine, Erde oder andere geeignete Stoffe beimengte.

Das Leclanché-Element ist in den verschiedensten Formen in der Telegraphie und dem Signalwesen ausserordentlich verbreitet. Es eignet sich nur zur Erzeugung kurz dauernder, schwacher Ströme. Bei Anwendung starker Ströme tritt alsbald kräftige Polarisation ein; ungebraucht an der Luft stehend erholt es sich rasch.

Die EMK ist anfänglich 1,38 Volt. Der innere Widerstand schwankt je nach der Grösse zwischen 3 bis 10 ω.

Wenn die Flüssigkeit das Glas nur etwa bis zur Hälfte füllt, ist auch das Ausblühen von Krystallen geringfügig, und das Element kann ohne jede Aufsicht viele Monate lang benutzt werden.

Um das Kriechen der Lösungen und Ausblühen von Krystallen zu verhindern, wird auf vier Teile Salmiak je ein Teil Kochsalz und ein Teil Zinkchlorid zugesetzt, oder es werden dünne Lösungen mit einer Beimengung von Glycerin verwendet. Auch die Zugabe der unter dem Namen Calcidum von Busse in Linden hergestellten Flüssigkeit von unbekannter chemischer Zusammensetzung hat sich in der Praxis bewährt.

[1]) ETZ 1894, S. 123.

b) Das Element von De Lalande und Chaperon[1]) (1881); das Cupron-Element (1893).

Der Boden eines hermetisch verschlossenen gusseisernen Gefässes V (Fig. 336) ist mit Kupferoxyd (Kupferasche) R bedeckt. Durch den luftdicht schliessenden Deckel geht, durch Hartgummi isoliert, ein Metallstab, der unten eine Zinkspirale D, oben eine Klemmschraube F trägt; das Zink taucht in die Erregerflüssigkeit, Ätzkalilauge (30 bis 40% KHO entsprechend), ein. Um die Kohlensäure der Luft abzuhalten und entstehenden Gasen den Austritt zu gestatten, geht ausserdem durch den Deckel ein S-förmig gebogenes Glasröhrchen H, in dessen nach oben offenem Teile eine kugelförmige Erweiterung angeblasen ist, in der sich einige Tropfen Glycerin befinden.



Fig. 336. Das ältere Lalande-Element.

Wird das Element in Thätigkeit gesetzt, so wird Wasser zerlegt. Der Sauerstoff oxydiert das Zink, und das Zinkoxyd löst sich in der Kalilauge auf. Der Wasserstoff dagegen reduziert das Kupferoxyd zu Kupfer. Die EMK beträgt ungefähr 1 Volt; der innere Widerstand ist verhältnismässig sehr gering, für grössere Zellen etwa $^1/_4$ ω.

Das Element kann nach längerem Gebrauche leicht regeneriert werden, entweder indem man längere Zeit einen schwachen Strom von entgegengesetzter Richtung hindurchsendet, oder indem man das Kupferoxyd heraus nimmt und unter kräftigem Luftzutritt glüht.

Man kann diese Elemente daher auch für grössere Stromstärken, z. B. für Brennapparate der Ärzte und für ganz kleine Beleuchtungseinrichtungen, verwenden.

In der Form des Cupron-Elementes von Umbreit & Matthes hat das Kupferoxyd-Alkali-Zink-Element erhebliche Verbreitung gefunden. Es ist wohl das einzige Element, das z. Z. für die Starkstromtechnik praktische Bedeutung hat. Die wesentliche Neuerung liegt nur darin, dass es gelungen ist, eine poröse, widerstandsfähige Kupferoxydplatte herzustellen und dadurch den inneren Widerstand des Elementes zu verkleinern.

---

[1]) Dieses Element ist späterhin von Edison aufgenommen und vervollkommnet worden. Ausgedehnte Anwendung in der Praxis hat das Element erst gefunden, seit ihm Umbreit & Matthes in Leipzig die Gestalt des Cupron-Elementes gegeben haben.

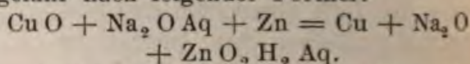
In einem viereckigen Glaskasten befindet sich zwischen je zwei amalgamierten Zinkplatten eine solche poröse Kupferoxydplatte. Das Gefäss ist mit Kali- oder Natronlauge von 20° Bé gefüllt. Die beiden Gruppen gleichnamiger Platten sind mit je einer Polklemme verbunden (vergl. Fig. 337).

Um die Einwirkung der Kohlensäure der Luft auszuschliessen, wird oben auf die Erregerflüssigkeit eine Schicht von Paraffinöl gegossen.



Fig. 337. Cupron-Element von Umbreit & Matthes.

Der chemische Vorgang bei dem Gebrauche des Elementes vollzieht sich ungefähr nach folgender Formel:



$$CuO + Na_2O\,Aq + Zn = Cu + Na_2O + ZnO_2\,H_2\,Aq.$$

Der Zinkverbrauch des Elementes beträgt ungefähr 1,25 *g* für eine Ampèrestunde; gleichzeitig werden ungefähr 3 *g* reines Ätznatron verbraucht.

Die Lösung des Zinkoxydhydrates in der Natronlauge sinkt infolge des grösseren spezifischen Gewichtes zu Boden. Das Zink bleibt daher blank, und das Element arbeitet solange, bis die Lauge mit Zinkoxyd gesättigt oder das Oxyd auf der Kupferplatte aufgebraucht ist.

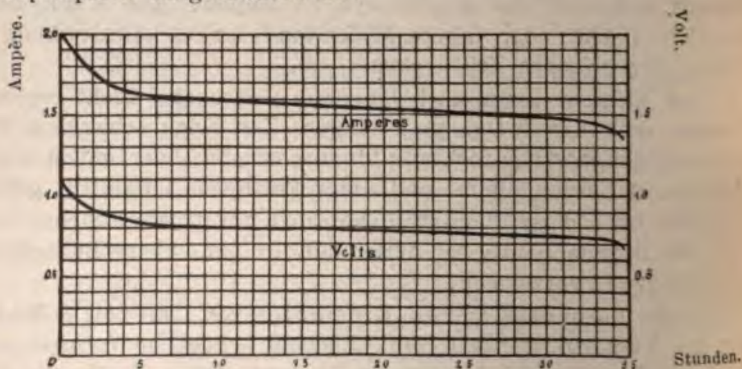


Fig. 338. Strom- und Spannungskurve eines Cupron-Elementes.

Die anfängliche EMK des Cupron-Elementes liegt zwischen 1 und 1,1 Volt, bald aber sinkt sie auf 0,85 Volt, einen Wert, der dann bald bis zum Ende der Gebrauchsfähigkeit unverändert bleibt.

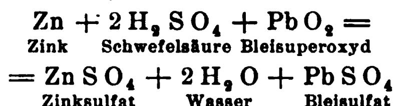
Das obenstehende Diagramm (Fig. 338) zeigt beispielsweise die Leistung eines solchen Elementes von 1,5 *kg* Gewicht, welches mit 200 *g* Ätznatronlauge gefüllt war, wenn es mit einem äusseren Widerstand von 0,43 Ohm geschlossen wurde.

Der innere Widerstand betrug im Mittel 0,06 Ohm, die mittlere Stromstärke 1,55 A, die mittlere Klemmenspannung 0,76 Volt, die Kapazität bis zur Erschöpfung 53,5 Ampèrestunden.

Nachdem das Element entladen worden ist, wird die Kupferplatte sorgsam ausgewaschen, getrocknet, und etwa 24 Stunden an der Luft stehen gelassen. Die Platte absorbiert dann Sauerstoff aus der Luft und regeneriert sich von selbst. Erwärmen begünstigt die Oxydation. — Hierauf setzt man die Platten wieder ein, füllt mit frischer Lauge und das Element ist wieder gebrauchsfähig.

c) Elemente mit Bleisuperoxyd.

Auf der Fähigkeit des Bleisuperoxyds, Sauerstoff abzugeben, von der neuerdings in anderer Weise in den Akkumulatoren Anwendung gemacht wird, beruhen verschiedene Konstruktionen, die auf Vorschläge von de la Rive und von Beetz zurückzuführen sind. In verdünnte Schwefelsäure taucht einerseits eine amalgamierte Zinkplatte, anderseits eine Kohlen- oder Bleiplatte. Letztere ist mit einer kräftigen Schicht von Bleisuperoxyd überzogen, dem Kohlenstücke beigemengt sind. Die anfängliche EMK dieser Zellen beträgt über 2 Volt, dieselbe sinkt aber bei dem Gebrauche rasch; ausserdem erhöht sich bei längerer Verwendung der innere Widerstand, da unlösliches Bleisulfat die Oberfläche der Elektrode überzieht. Der chemische Vorgang in der Zelle ist der folgende:



$$\underset{\text{Zink}}{Zn} + \underset{\text{Schwefelsäure}}{2\,H_2SO_4} + \underset{\text{Bleisuperoxyd}}{PbO_2} =$$

$$= \underset{\text{Zinksulfat}}{ZnSO_4} + \underset{\text{Wasser}}{2\,H_2O} + \underset{\text{Bleisulfat}}{PbSO_4}$$

Es kommen jedoch noch viele sekundäre Prozesse hinzu. Am besten sind Zellen dieser Art zu gebrauchen, wenn man sie als Tauchelemente einrichtet, d. h. das Zink nur während der Dauer der Benutzung in die Flüssigkeit einsenkt.

Die Bleisuperoxydplatte kann in einem gewöhnlichen Akkumulator beim Laden regeneriert werden.

6. Depolarisation durch Sauerstoffsäuren.

Da Säuren, die viel Sauerstoff enthalten, amalgamiertes Zink auflösen, auch wenn kein Strom erzeugt wird, so muss man im allgemeinen diese Säure durch eine poröse Thonzelle von dem Zink trennen.

a) Das Grove-Element (1838).

Ein S-förmiger Platinstreifen taucht in konzentrierte Salpetersäure (Dichte 1,33), die sich in einer porösen Thonzelle befindet

(vergl. Fig. 339a; das Platin samt dem Hartgummideckel, der die Thonzelle abschliesst, ist neben der Hauptfigur noch besonders dargestellt [Fig. 339b]). Das gut amalgamierte Zink befindet sich in verdünnter Schwefelsäure (1 : 10). Die EMK ist 1,9 Volt, der innere Widerstand bei frisch vorgerichteten Zellen von 20 *cm* Höhe ungefähr 0,1 ω. Für jede Ampèrestunde werden 1,3 *g* Zink verbraucht.

In diesen Elementen wird gelöstes Zinksulfat gebildet, dessen Bildungswärme für jedes Molekül (in *g*) 108000 Kalorien beträgt. Anderseits wird Salpetersäure annähernd zu gleichen Teilen in



Fig. 339a. Aeussere Erscheinung des Grove-Elementes.



Fig. 339b. Platinblech eines Grove-Elementes.

Stickstoffdioxyd N_2O_4 und in salpetrige Säure NO_2H zerlegt; die Bildungswärme der flüssigen Salpetersäure aus diesen Substanzen und Sauerstoff ist 13800 und 27600 Kalorien.

Man erhält somit, da Zink zweiwertig ist (vergl. S. 95), für die EMK des Elementes:

$$0{,}0000439 \frac{108000 - \frac{13800 + 27600}{2}}{2} = 1{,}9 \text{ Volt,}$$

in guter Übereinstimmung mit dem durch Versuche gefundenen Werte. Mit Rücksicht auf das Helmholtz-Thomson'sche Gesetz kann man daraus schliessen, dass der Temperaturkoëffizient dieses Elementes nahezu Null sein muss.

Um die Kosten für das Platin zu mindern, werden auch Bleiplatten verwendet, deren Oberfläche auf galvanischem Wege stark platiniert ist.

Ist die Salpetersäure nicht mehr wirksam genug oder zu wenig konzentriert, so kann man dieselbe durch Zusatz von unverdünnter Schwefelsäure wieder kräftiger machen.

b) Das Bunsen-Element (1842).

Dieses Element unterscheidet sich von dem Grove-Element nur dadurch, dass das teure Platin durch einen Cylinder oder ein rechteckiges Stück künstlicher, harter Kohle ersetzt wird. Die nebenstehende Abbildung (Fig. 340) zeigt die jetzt am meisten verbreitete, sogenannte französische Form dieser Zellen.



Fig. 340. Bunsen-Element.

Der grösste Übelstand bei dem Gebrauche dieser Zellen ist die starke Entwickelung von giftigen, braunroten Dämpfen (von NO_2 und N_2O_3).

c) Das Sosnowski-Element.

Sosnowski hat vorgeschlagen, das Zink statt mit verdünnter Schwefelsäure mit Kali- oder Natronlauge zu umgeben. Die EMK ist dann ungefähr 2,3 bis 2,4 Volt. Für die depolarisierende Flüssigkeit, in der die Kohle steht, wird eine aus gleichen Teilen verdünnter Schwefelsäure (1 Säure auf 3 Wasser), Salpetersäure von 36° Beaumé, konzentrierte Salzsäure und Wasser bestehende Flüssigkeit verwendet. Man muss etwa dreimal soviel Lauge als Säure verwenden.

d) Die Eisen-Elemente (1841).

Von Poggendorff und von Schönbein war die Wahrnehmung gemacht worden, dass Eisen von konzentrierter Salpetersäure nicht angegriffen, sondern passiv wird. Der Gedanke lag daher nahe, in dem Grove-Element das Platin durch solches passiv gemachtes Eisen zu ersetzen. Die Anschaffungskosten werden geringer, die Eisenelektroden sind fester als Platin und Kohle, und die Polklemmen können leichter und dauerhafter angebracht werden.

Verbesserungsvorschläge, welche für alle Elemente dieser Gruppe anwendbar sind, gehen dahin, die verdünnte Schwefelsäure, in der das Zink steht, durch verdünnte Salzsäure zu ersetzen, da die Bildungswärme des Chlorzinks etwas grösser ist, als die des Zinksulfats, und das Chlorzink löslicher ist, als das Sulfat. Will man billige ungereinigte (arsenhaltige) Schwefelsäure benutzen, so muss

man dieselbe dadurch brauchbar machen, dass man sie mit etwas Rüböl (5 *ccm* auf 1 *l*) schüttelt.

e) Die Chromsäure-Elemente (1842).

Diese Elemente, die zuerst von Poggendorff vorgeschlagen worden sind, werden neuerdings nach Bunsen's Vorgang zumeist als Tauchelemente in den verschiedensten Formen hergestellt. Kohle und amalgamiertes Zink tauchen beide in eine Lösung von Chromsäure. Die Säurelösung stellt man dadurch her, dass man 200 Gewichtsteile fein gepulvertes Natriumbichromat in 1300 Teilen Wasser löst und unter stetem Umrühren in feinem Strahle 425 Teile Schwefelsäure (Dichte 1,69) zugiesst.[1])

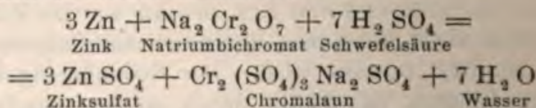


Fig. 341. Chromsäure-Tauchelement.

Bei Elementen, die nach Grenet's Vorschlag Flaschenform haben (vergl. Fig. 341), wird das Element dadurch in Thätigkeit gesetzt, dass man das Zink in die Flüssigkeit einsenkt. Das Zink Z ist zu dem Zwecke an einem Metallstabe befestigt, der sich in einer federnden Metallröhre verschieben lässt, die mit einer Polklemme in Verbindung steht. Die beiden Kohlenplatten K K tauchen stets zur Hälfte in die Erregungsflüssigkeit ein.

Der chemische Vorgang im Bichromatelement ist ziemlich verwickelt. Es wird Zink durch Schwefelsäure aufgelöst, Zinksulfat gebildet und Wasserstoff frei gemacht. Der Wasserstoff reduziert Chromsäure zu Chromoxyd, und dieses verbindet sich mit Schwefelsäure zu Chromsulfat. Chromsulfat und Natriumsulfat vereinigen sich zu einem Doppelsalz, dem Chromalaun.

Die nachfolgende chemische Reaktionsformel stellt den Verlauf des chemischen Prozesses annähernd dar:



$$\underset{\text{Zink}}{3\,Zn} + \underset{\text{Natriumbichromat}}{Na_2\,Cr_2\,O_7} + \underset{\text{Schwefelsäure}}{7\,H_2\,SO_4} =$$

$$= \underset{\text{Zinksulfat}}{3\,Zn\,SO_4} + \underset{\text{Chromalaun}}{Cr_2\,(SO_4)_3\,Na_2\,SO_4} + \underset{\text{Wasser}}{7\,H_2\,O}$$

Die EMK dieses Elementes kann rund zu 2 Volt angenommen werden. Der innere Widerstand ist je nach der Plattengrösse sehr verschieden, zumeist aber nicht sehr gross, da die Entfernung der Platten voneinander gering ist. Zumal für kurzdauernde Ströme von beträchtlicher Stärke, wie solche zu galvanokaustischen Arbeiten erforderlich sind, werden diese Batterien in den verschiedensten

---

[1]) Ein anderer Vorschlag von Walter lautet: 150 Teile Natriumbichromat, 250 Teile Schwefelsäure und 300 Teile Wasser. — Hammerl empfiehlt: 2100 Teile Wasser, 300 Teile Schwefelsäure, 65 Teile käufliche Chromsäure.

Formen gern benutzt. Vor den Elementen von Bunsen und Grove haben sie den Vorzug, dass sie keinerlei Dämpfe entwickeln.

Will man ein zu rasches Sinken der EMK vermeiden, so wird Luft unter die Platten eingeblasen. Wenn man fortdauernd Luft einbläst, allmählich immer neue Säure eintreten lässt und die verbrauchte Säure abführt, so können solche Batterien (Cirkulationsbatterien) sogar für Zwecke der elektrischen Beleuchtung verwendet werden.

Die Flüssigkeit, die anfänglich braunrot ist, muss erneuert werden, wenn sie (durch Chromalaun) eine grünliche Färbung angenommen hat.

7. Depolarisation durch Ausscheiden von Metallen an Stelle des Wasserstoffs.

In diese Gruppe gehören die ältesten Elemente, die für schwache und nicht zu lange Zeit hindurch andauernde Ströme (Telegraphenströme) hergestellt worden sind.

a) Das Daniell-Element (1836).

Bei diesen Zellen befindet sich in einem Gefäss ein Zinkcylinder in einer Zinksulfatlösung; im Innern des Zinkcylinders steht eine poröse Thonzelle, die Kupfer, von Kupfersulfatlösung umgeben, enthält. Der chemische Vorgang in diesen Zellen ist bereits früher (Kap. IV, Abschn. 7, S. 95) besprochen worden. Der innere Widerstand ist je nach der Grösse der Elemente sehr verschieden, wohl aber selten unter 2 ω.

Da bei Gebrauch nur ganz schwacher Ströme die EMK wenig veränderlich, gleich 1,07 V, ist, auch wenn die Konzentration der Lösungen sehr verschieden ist, werden nach dem Typus des Daniell-Elementes besonders Normalelemente konstruiert.

Die Kupfersulfatlösung würde bei längerer Benutzung des Daniell-Elementes rasch verbraucht werden; man hat daher Sorge dafür getragen, dass ein Ersatz des gebrauchten Kupfersulfates stattfindet, und ist dadurch auf die Konstruktion von Elementen geführt worden, die mit einem Überschuss von Kupfersulfat versehen sind.

b) Das Callaud-Element.

Nur eine andere Form des Daniell-Elementes ist das seiner Einfachheit und Billigkeit wegen zumal im Telegraphenbetrieb mit Ruhestrom vielfach verwendete Element von Callaud. Fig. 342 stellt dasselbe dar. Auf dem Boden eines Glases G ruht, von Krystallen von Kupfersulfat umgeben, eine Kupferplatte K von ringförmiger oder

spiralförmiger Gestalt. Ein mit einer isolierenden Hülle umgebener Draht führt bis über das Glas hinaus. Auf der Sulfatlösung steht ohne poröse Zwischenschicht die Zinksulfatlösung, in die ein am Rande des Glases aufgehängter Zinkcylinder Z eintaucht.

c) Das Meidinger-Element (1859).

Noch heute ist dieses Element eines der verbreitetsten für die Zwecke der Telegraphie. In einem Gefässe g, welches oben weiter ist als unten (vergl. Fig. 343), befindet sich unten ein Kupferblech K oder der Billigkeit wegen auch ein Bleiblech in einer Lösung von Kupfersulfat. Um diese Lösung immer nahezu konzentriert zu erhalten, ragt von oben eine mit Krystallen von Kupfervitriol und Wasser gefüllte Flasche b verkehrt in diese Lösung hinein. Durch



Fig. 342. Das Callaud-Element.



Fig. 343. Das Meidinger-Element.

den Stopfen, der den Hals der Flasche verschliesst, ist ein Glasrohr r von passender Weite geführt. Infolge der grösseren Dichte der konzentrierten Sulfatlösung fliesst bei passend gewähltem Querschnitte immer solche Lösung in dem Masse nach, als ein Verbrauch an Kupfersulfat stattfindet. Ein mit Isolation umgebener Draht geht vom Bleiblech aus bis über das obere Ende des Glases hinaus und bildet den positiven Pol. Auf dem unteren Rande der Erweiterung des Gefässes g ruht ein Zinkcylinder z, der in eine Lösung von Magnesiumsulfat (Bittersalz) eintaucht. Da die Dichte der Bittersalzlösung geringer ist, als die der Kupfersulfatlösung, so stehen die Flüssigkeiten ohne poröse Zwischenschicht unmittelbar übereinander.

Die EMK ist bei diesen Zellen genau dieselbe, wie bei dem Daniell-Element, ungefähr 1,07 V. Der innere Widerstand ist an-

fänglich ziemlich gross, sinkt aber nach mehreren Tagen auf etwa 5 ω herab.

Es ist ein Nachteil dieser Elemente, dass sie nicht transportiert werden können und dass allmählich Wucherungen des ausgeschiedenen Kupfers entstehen, die schliesslich bis zum Zink hinaufreichen. Nach Ablauf mehrerer Monate müssen diese Zellen daher nachgesehen und frisch zusammengesetzt werden. Die Konstanz der Elemente bei Beanspruchung durch schwache Ströme ist sehr gross.

d) Quecksilber-Elemente.

Da die EMK der dem Daniell'schen Elemente nachgebildeten Zellen verhältnismässig gering ist, haben für ärztliche Zwecke, bei welchen stärkere Ströme gebraucht werden, Marié-Davy, Beaufils, Gaiffe, Trouvé und andere das Kupfer durch Quecksilber ersetzt. Das Element ähnelt äusserlich dem Bunsen-Element, nur wird die Salpetersäure durch eine Lösung von schwefelsaurem Quecksilberoxydul, $Hg_2 SO_4$, ersetzt. Die Thonzelle kann bei Elementen, die nur vorübergehend gebraucht werden, wegfallen. Diese Elemente bleiben für einige Stunden ziemlich konstant; dann aber tritt ein rascher Abfall der Spannung ein, und das Sulfat muss durch neue Lösung ersetzt werden. Bei einigen Formen wird die Kohle in einen Brei aus Quecksilbersulfat eingebettet. Bei dem Sturz-Element von Trouvé ist die poröse Scheidewand weggelassen. Das Element tritt in Thätigkeit, wenn es umgekehrt wird und die Flüssigkeit die Verbindung zwischen der Kohle C und dem Zink Z herstellt (vergl. Fig. 344).

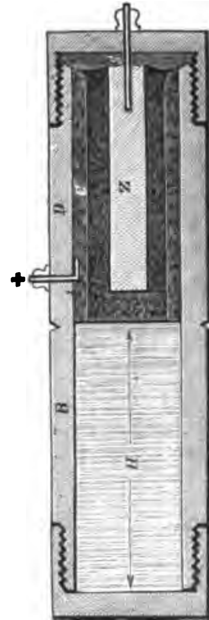


Fig. 344. Sturz-Element von Trouve.

Die EMK aller dieser Elemente hat einen Wert von ungefähr 1,5 bis 1,6 V; der innere Widerstand ist klein. Störend ist die Notwendigkeit das Element oft mit dem giftigen Quecksilbersulfat neu beschicken zu müssen.

e) Normal-Elemente.

Wir haben schon früher, gelegentlich der Besprechung der Spannungsmessungen mit dem Elektrometer (Kap. XI, Abschn. 1, S. 201), darauf hingewiesen, dass es Elemente giebt, deren EMK fast unveränderlich ist, und dass man deren Klemmenspannung im offenen Zustande als Ausgangspunkt für solche Messungen nehmen kann. Ein solches Normal-Element soll überall leicht herstellbar

sein und eine thunlichst unveränderliche, auch durch die Temperatur nicht merklich beeinflusste EMK besitzen.

Früher bediente man sich besonders der Daniell-Zelle (Post office standard cell) als Normale. Chemisch reines Zink, mit chemisch reinem Quecksilber amalgamiert, befand sich in einer konzentrierten Lösung von Zinkvitriol. Eine poröse Thonzelle mit gesättigter Kupfervitriollösung, in die ein Kupferblech eintaucht, wird für gewöhnlich in destilliertem Wasser aufbewahrt; nur während der Messung wird die Thonzelle mit ihrem Inhalt in das andere Gefäss mit Zinkvitriol hineingestellt. Die EMK ist sehr konstant, 1,07 Volt, und von kleinen Temperaturschwankungen fast unabhängig.

Auch die Normal-Elemente von Siemens & Halske, die neuerdings vielfach zur Nachprüfung der Torsionsgalvanometer benutzt werden, sind einfache Daniell-Elemente. Dieselben werden für jede Messung neu zusammengesetzt; das Zink wird jedesmal frisch amalgamiert. Diese Zellen haben keine poröse Thonzelle, sondern das Zinksulfat wird durch einen geeignet eingerichteten Heber mit ganz reiner Trennungsschicht über der Kupferlösung ausgebreitet. Fünf solcher Elemente in Parallelschaltung haben, wenn sie durch einen Widerstand von 100 ω (ein Torsionsgalvanometer, vergl. S. 148 ff.) geschlossen werden, eine Klemmenspannung von 1,090 Volt, bei Schliessung durch 10 ω eine Klemmenspannung von 1,054 Volt.



Fig. 345. Normalelement nach Latimer Clark.

Als das zuverlässigste Normal-Element, allerdings nur für den Gebrauch mit dem Elektrometer (vergl. Kap. XI, Abschn. 1, S. 201) oder mit Kondensatoren, nicht aber für Stromabgabe, gilt das Normal-Element von Latimer Clark. Die zweckmässigste Form desselben, welche von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vorgeschlagen worden ist, wird durch obenstehende Fig. 345 erläutert. Dasselbe hat als positiven Pol ein amalgamiertes Platinblech; von diesem führt ein in ein Glasrohr eingeschmolzener Platindraht aus dem Deckel hinaus und bildet den + Pol. Das amalgamierte Platinblech ist mit Quecksilberoxydulpaste umgeben, die in eine Thonzelle eingeschlossen ist. Diese Thonzelle ragt in eine Schicht von chemisch reinen Zinksulfatkrystallen hinein, die sich am Boden des Glasgefässes befinden. Ebenso endet in dieser Schicht ein unten umgebogener Stab von chemisch reinem Zink, dessen oberer Teil durch ein mit Paraffin ausgegossenes Glasrohr geschützt wird.

Die EMK des Elementes E ist bei der Temperatur von t° C.:

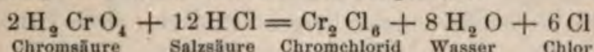
$$E = 1{,}435 - 0{,}001 \cdot (t - 15).$$

8. Depolarisation durch Chlor und Chloride.

Da Chlor bekanntlich eine besonders starke chemische Anziehungskraft auf Wasserstoff ausübt (die Verbindungswärme der Salzsäure ist grösser als die des Wassers), lag es nahe, dass die Erfinder galvanischer Zellen ihre Aufmerksamkeit ganz besonders auf die Verwendung des Chlors als depolarisierendes Mittel gerichtet haben. Es sind eine grosse Anzahl von Zellen in Vorschlag gebracht worden, die sich besonders dazu eignen, für stärkere Ströme verwendet zu werden, und bei einer hohen EMK (meist gegen 2 Volt) äusserst geringe Polarisation zeigen. Der Verwendung von freiem Chlor in der Form von Chlorwasser (wie dies Upward vorgeschlagen hat) steht allerdings der Umstand im Wege, dass es sehr schwierig ist, das Entweichen der schädlichen Chlordämpfe zu vermeiden.

a) Chlor-Element von d'Arsonval (1881).

Batterien mit wechselnder Flüssigkeit hat d'Arsonval dadurch hergestellt, dass er auf die Kohlenelektrode eines Zink-Kohlen-Elementes ohne poröse Thonzelle eine Mischung von Salzsäure und gleichen Raumteilen Kaliumbichromatlösung tropfen und die verbrauchte Flüssigkeit abfliessen liess. Der chemische Vorgang, der sich vollzieht, wird durch die Formel dargestellt:



$$\underset{\text{Chromsäure}}{2\,H_2CrO_4} + \underset{\text{Salzsäure}}{12\,HCl} = \underset{\text{Chromchlorid}}{Cr_2Cl_6} + \underset{\text{Wasser}}{8\,H_2O} + \underset{\text{Chlor}}{6\,Cl}$$

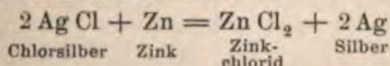
Das Chlor wirkt noch nahezu vollständig depolarisierend, selbst wenn man einem Elemente von 20 *cm* Höhe einen Strom von 10 Amp. entnimmt. Chlordämpfe entwickelt das Element nicht. Allerdings greift die Flüssigkeit das Zink an, auch wenn das Element keinen Strom giebt.

b) Die Chlorsilber-Elemente.

Diese Elemente werden zumal für ärztliche Zwecke vielfach verwendet, da sie weder Gase entwickeln, noch Flüssigkeiten enthalten, die giftig sind oder schädlich wirken.

Ein Stab aus reinem Silber oder ein Kupferstab, der auf galvanischem Wege mit Silber überzogen worden ist, befindet sich in einem Brei aus Chlorsilber, welcher durch ein an dem Stabe befestigtes Leinwandsäckchen zusammengehalten wird. Als Erregerflüssigkeit dient Salmiaklösung, in welche ein amalgamierter Zinkstab eintaucht.

Von zahlreichen sekundären Vorgängen abgesehen, verläuft der Vorgang ungefähr nach der Formel:



$$\underset{\text{Chlorsilber}}{2\,AgCl} + \underset{\text{Zink}}{Zn} = \underset{\text{Zinkchlorid}}{ZnCl_2} + \underset{\text{Silber}}{2\,Ag}$$

Es wird somit Silber auf dem Silberstabe niedergeschlagen.

Die EMK kann man berechnen, wenn man von der Bildungswärme des gebildeten Chlorzinks die des zerlegten Chlorsilbers abzieht und mit der bekannten Konstante (vergl. S. 95) multipliziert:

$$0{,}0000436\left(\frac{113000}{2} - 29000\right) = 1{,}20 \text{ Volt.}$$

Die Messungen der EMK ergaben nur 1,03 Volt, was darauf hindeutet, dass die sekundären chemischen Prozesse nicht zu vernachlässigen sind, oder dass der Vorgang anders verläuft, als ihn obige Gleichung darstellt, oder dass das Element einen merklichen positiven Temperaturkoëffizienten hat.

Die Salmiaklösung (Warren de la Rue und Müller) kann auch durch Lösungen von Chlorzink (Gaiffe), Kochsalz (Pinkus) oder kaustischem Kali (Skriwanow) ersetzt werden.

c) Das Skriwanow'sche Quecksilber-Element (1881).

Auf dem Boden eines Gefässes befindet sich eine Kohlenelektrode, die mit einem Brei bedeckt ist, der auf folgende Weise hergestellt wird: Durch Kochen von Quecksilberoxyd in Salmiaklösung, in das man nachträglich Quecksilberchlorid einträgt, werden 10 Teile Ammoniumquecksilberchlorid hergestellt und mit 3 Teilen Kochsalz und $^1/_4$ Teil Chlorsilber zusammengeschmolzen. Diese Schmelze wird pulverisiert und mit Zinkchlorid zu einem Brei angerührt. Den Brei bedeckt man mit Sand oder Asbestfäden, die mit Chlorzink oder Salmiak angefeuchtet sind. Gegen die Asbestschicht drückt man eine amalgamierte Zinkplatte, wenn man dem Elemente Strom entnehmen will. Da freie Flüssigkeit nicht vorhanden ist, kann man diese Zellen auch als Trockenelement verwenden. Die Klemmenspannung des offenen Elementes beträgt 1,6 Volt.

9. Die Herstellungskosten elektrischer Energie durch galvanische Elemente.

Wir denken uns eine Batterie von n Elementen, deren jedes eine EMK gleich e besitzt, und entnehmen derselben einen Strom von i A. Dann werden, wenn das (auf 1 Coulomb bezogene) elektrochemische Äquivalent (vergl. Kap. III, Abschn. 3, S. 82) eines in den Zellen zersetzten oder gebildeten Körpers q ist, in einer Sekunde P Gramm dieses Körpers chemisch verändert werden, und es muss

$$P = n\,q\,i, \text{ oder } i = \frac{P}{n\,q}$$

sein. Die von der Batterie in einer Sekunde entwickelte elektrische Energie ist:

$$n e i = \frac{n e P}{n q}.$$

Der einer elektrischen Pferdestärke (736 Voltampère, vergl. S. 37) in einer Sekunde entsprechende Verbrauch an Substanz ist somit:

$$736 = \frac{e P}{q}, \text{ oder } P = 736 \frac{q}{e} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Für Wasserstoff ist q = 0,00001036. Es werden somit in einer Sekunde:

$$P = \frac{736 \cdot 0{,}00001036}{e} \; g \text{ Wasserstoff}$$

in einem Elemente ausgeschieden. Für eine Stundenpferdestärke wäre diese Zahl noch mit 3600 zu multiplizieren.

Für andere Stoffe ist die zur Verwendung gelangende Menge im Verhältnis des Äquivalentgewichtes grösser. Setzt man z. B. näherungsweise e für das Daniell-Element gleich 1, so betragen die für jede Stundenpferdestärke bei diesem Elemente erforderlichen Mengen:

Zink	0,9 *kg*
Schwefelsäure	1,3 »
Kupfersulfat	3,4 »

Dafür werden 0,87 *kg* Kupfer niedergeschlagen.

Nimmt man nun folgende Durchschnittspreise für je 1 *kg*: Zink 0,6 ℳ, Schwefelsäure 0,1 ℳ, Kupfersulfat 0,5 ℳ, so stellt sich der Aufwand beim Daniell-Element für jede Stundenpferdestärke auf:

$$0{,}9 \times 0{,}6 + 1{,}3 \times 0{,}1 + 3{,}4 \times 0{,}5 = 2{,}37 \text{ ℳ}.$$

Rechnet man den Wert von 1 *kg* des auf diese Weise gewonnenen Kupfers zu 0,7 ℳ, so ist von dem vorstehenden Betrage noch 0,87 × 0,7 = 0,61 ℳ abzuziehen, und es bleibt, ganz abgesehen von den Kosten für Bedienung und Amortisation der Gefässe, Klemmen etc. noch eine Summe von 2,28 — 0,61 ℳ = 1,67 ℳ.

Da nun aber ein erheblicher Teil der entwickelten elektrischen Energie in der Batterie selbst verbraucht wird und sich stets wesentlich (1,3 bis 1,5 mal mehr) Zink auflöst, als dem chemischen Prozess entsprechen würde[1]), so stellt sich, wenn man z. B. mit einem Güteverhältnis von 50% arbeitet (vergl. Kap. II, Abschn. 5, S. 39), der Preis der im äusseren Stromkreise verfügbaren Energie gerade noch einmal so hoch.

Auch bei anderen Elementen stellt sich die Rechnung nicht erheblich günstiger. Wir teilen im Nachstehenden eine auf heutige

[1]) Der Ausnutzungskoëffizient des Zinks, d. h. der Bruchteil der verbrauchten Zinkmenge, die wirklich zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet wird, beträgt z. B. beim Daniell-Element und seinen Verwandten ungefähr 0,80, beim Chromsäure-Tauchelement 0,5, beim Bunsen'schen Elemente mit Salpetersäure 0,78 bei sechsstündigem Gebrauche, beim Cupron-Element 0,8.

mittlere Preise der Materialien umgerechnete Zusammenstellung mit, die sich auf ein Güteverhältnis von ungefähr 60 % bezieht.

Name des Elementes	Kosten einer im äusseren Stromkreise verfügbaren Pferdekraftstunde
Daniell	2,6 ℳ
Grove	1,7 »
Bunsen (bei Gebrauch rauchender Salpetersäure)	2,4 »
Chromsäure-Elemente	3,4 »
Leclanché	4,2 »
Lalande & Chaperon	6,0 »
Cupron-Element	5,8 »

Dagegen stellt sich der Preis einer Pferdekraftstunde bei Maschinenbetrieb und selbst bei Verwendung von Akkumulatoren so wesentlich billiger, dass jetzt nur noch unter besonderen Umständen grössere Elektrizitätsmengen durch Elemente erzeugt werden. In grösseren Anlagen (1500 Stück 16 kerzige Lampen) mit Dampfmaschinenbetrieb und Akkumulatoren kostet die elektrische Pferdekraftstunde bei sehr grossen Anlagen etwa 0,16 ℳ und bei ganz kleinen Hausanlagen (26 Stück 16 kerzige Lampen) mit Gasmotor und Akkumulatoren etwa 0,50 ℳ. Hierbei sind Verzinsung und Amortisation des Anlagekapitals für die Einrichtung zur Stromerzeugung mit 15 %, der Kohlenpreis zu 0,02 ℳ für 1 *kg* und der Gaspreis zu 0,13 ℳ für 1 *cbm* gerechnet. Von den elektrischen Centralstationen wird für Beleuchtungszwecke die Pferdekraftstunde im Mittel etwa zu 0,40 ℳ abgegeben. [1])

Selbstverständlich sind solche Zahlen nur ganz rohe Überschläge, die im besonderen Falle um mehr als die Hälfte abweichen können; sie zeigen jedoch den grossen Unterschied, der in wirtschaftlicher Beziehung zwischen den beiden Erzeugungsarten der Elektrizität besteht.

Für Einrichtungen mit ganz geringem Stromverbrauch kommt in Betracht, dass das Anlagekapital für Elemente verhältnismässig sehr gering ist (2 bis 6 ℳ für ein Element), dass diese als Stromquellen jederzeit dienstbereit sind und nur einen geringen Aufwand für Bedienung erfordern. Für Haustelegraphie und Fernsprechanlagen, für ärztliche Zwecke und für den Gebrauch in Laboratorien werden die Elemente daher auch künftighin noch eine gewisse Bedeutung behalten.

---

[1]) 3 ₰ für eine Brennstunde einer 16 kerzigen Glühlampe, die 55 Watt verbraucht.

XXVIII. Kapitel.

Die Akkumulatoren.

1. Allgemeine Vorbemerkungen.

Das Bedürfnis nach Vorrichtungen, welche sich zur Ansammlung und Aufbewahrung elektrischer Energie eignen, wird so lebhaft empfunden, dass die elektrotechnische Industrie schon seit mehreren Jahrzehnten unaufhörlich bestrebt gewesen ist, solche herzustellen.

Die ersten von praktischen Erfolgen gekrönten Versuche in dieser Richtung haben Planté und Faure gemacht. Sie benutzten die Wahrnehmung, dass Bleiplatten, die längere Zeit hindurch in verdünnter Schwefelsäure als Elektroden für eine Wasserzersetzung durch den elektrischen Strom gedient hatten, für einige Zeit einen kräftigen, in entgegengesetzter Richtung durch die Zersetzungszelle fliessenden elektrischen Strom zu erzeugen imstande seien, wenn man nach Aufhören des die Wasserzersetzung hervorrufenden Stromes zwischen den Bleiplatten eine anderweite leitende Verbindung herstellt.[1]) Es stellte sich gleichzeitig heraus, dass die Bleiplatten diese Eigenschaft, einen solchen entgegengesetzt gerichteten Strom zu liefern, längere Zeit hindurch behielten, und zwar um so mehr, je dicker die Oxydschicht gewesen war, welche vorher die Oberfläche der Bleiplatten bedeckt hatte. Man machte ferner die Wahrnehmung, dass Bleiplatten, welche öfter für solche Versuche gedient hatten, dadurch immer mehr die Fähigkeit gewannen, eine gewisse Elektrizitätsmenge in sich aufzunehmen und später wieder abzugeben.

Von der Erkenntnis, dass hier ein Vorgang vorliege, welcher als Grundlage für die Herstellung elektrischer Sammler dienen könne, bis zur fabrikmässigen Anfertigung von Akkumulatoren, welche für den Gebrauch im gewerblichen Leben geeignet sind, war noch ein langer und sehr mühevoller Weg zurückzulegen. Erst in den letzten Jahrzehnten ist es gelungen die zahlreichen Schwierigkeiten so weit zu überwinden, dass man jetzt für eine grosse Zahl von Zwecken, die wir späterhin näher bezeichnen werden, den Gebrauch

[1]) Auf die Thatsache, dass Bleiplatten zur Herstellung sekundärer Elemente besonders geeignet seien, hat Sinsteden schon im Jahre 1854 hingewiesen.

der unter dem Namen Akkumulatoren oder Sekundärbatterien bekannten elektrischen Sammler unbedenklich empfehlen kann.

Neuerdings hat man auch versucht, die Umkehrbarkeit gewisser anderer elektrochemischer Vorgänge zu benutzen, um elektrische Energie aufzuspeichern; Erfolge von erheblicher praktischer Bedeutung sind jedoch bis jetzt nicht erzielt worden.

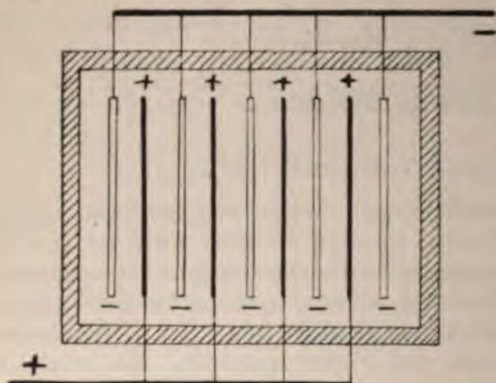


Fig. 346. Schematische Darstellung einer Sammlerzelle.

Die Anordnung einer Akkumulatorzelle im allgemeinen zeigt das nebenstehende Schema (Fig. 346). In einem mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten Gefässe stehen sich positive und negative Platten gegenüber. Die gleichnamigen Platten sind durch dicke Metallstreifen miteinander verbunden, sodass die Oberfläche einer Elektrode gleich der Summe der Oberflächen der einzelnen parallel geschalteten Platten ist. Damit die Platten entgegengesetzter Polarität sich nicht berühren können, werden dieselben durch dazwischen gestellte Glasröhren, Glasstäbe oder Hartgummistreifen oder durch gewellte und durchlochte Hartgummitafeln in unveränderlicher Entfernung gehalten.

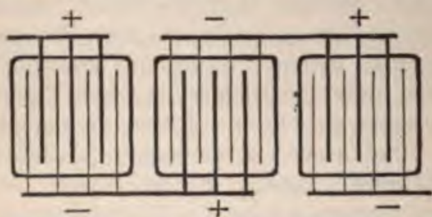
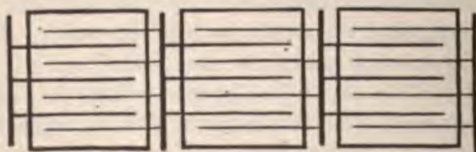


Fig. 347. Verbindung mehrerer Zellen miteinander.

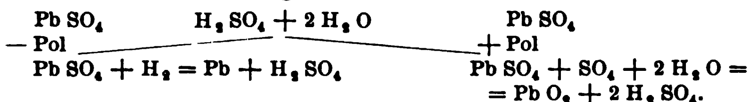
Die Verbindung mehrerer hintereinander geschalteter Zellen erfolgt entweder so, wie dies Fig. 347 zeigt, oder in der Weise, wie dies die Abbildung 348 schematisch darstellt.


Fig. 348. Andere Art der Zellenverbindung.

Da es sich bei den elektrischen Sammlern um einen sekundären Strom handelt, dessen Entstehung durch die Einwirkung eines vorher thätigen primären Stromes bedingt wird, nennt man diese Vorrichtungen auch Sekundär-Elemente oder Sekundär-Batterien.

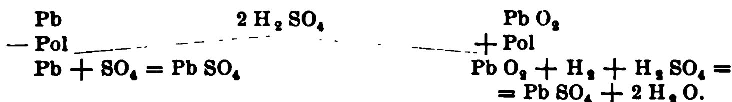
2. Die chemischen Vorgänge im Bleiakkumulator.

Ein ungeladener Akkumulator mit Bleiplatten kann in erster Annäherung als eine Zersetzungszelle angesehen werden, deren beide Elektroden Bleiplatten sind, die mit Bleisulfat ($Pb\,SO_4$) bedeckt sind und sich in einer verdünnten Lösung von Schwefelsäure in Wasser befinden. Wenn nun der Ladungsstrom zu wirken beginnt, wird Schwefelsäure ($H_2\,SO_4$) elektrolysiert. Der Vorgang während der Ladung lässt sich nach dem in Kap. IV, Abschn. 5, S. 90) entwickelten Schema in folgender Weise darstellen:



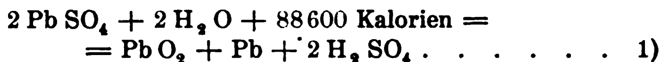
Am negativen Pol entsteht Blei, welches sich als silbergraue, schwammige Masse ausscheidet. Am positiven Pol wird dunkelbraunes Bleisuperoxyd gebildet. In der Lösung tritt eine Vermehrung des Gehaltes an Schwefelsäure ein.

Bei der Entladung vollzieht sich der Vorgang in folgender Weise:



An beiden Platten entsteht aufs neue Bleisulfat, und der grösste Teil der vorher frei gewordenen und in die Flüssigkeit übergegangenen Schwefelsäure wird wieder an die Bleiplatten gebunden.

Kurz kann der Vorgang im Bleiakkumulator durch die Gleichung dargestellt werden:



$$2\,Pb\,SO_4 + 2\,H_2\,O + 88600 \text{ Kalorien} = Pb\,O_2 + Pb + 2\,H_2\,SO_4 \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

Für die Ladung ist die Gleichung von links nach rechts, für die Entladung von rechts nach links zu lesen.

Für die Richtigkeit dieser Gleichungen spricht der Umstand, dass auch die Berücksichtigung der Wärmetönungen der chemischen Prozesse sehr befriedigende Übereinstimmung zeigt.

Berechnet man aus der in der Gleichung angegebenen Wärmetönung der Verbindungen nach Kap. IV, Abschn. 7, S. 93, die EMK, so findet man für die Spannung des Bleiakkumulators in befriedigender Übereinstimmung mit den Thatsachen 1,93 Volt. Die theoretische Berechnung der EMK aus den Verbindungswärmen kann hier für eine erste Annäherung benutzt werden, weil die EMK des Akkumulators von der Temperatur ziemlich unabhängig ist.[1])

[1]) Der Temperaturkoëffizient beträgt + 0,00033 für 1° C.

Es ist allerdings nicht zweifelhaft, dass noch eine Anzahl sekundärer und auch lokaler chemischer Prozesse in den Bleiakkumulatoren stattfinden. Für die Praxis aber genügt es, nur auf die durch die obigen Formeln dargestellten Vorgänge Rücksicht zu nehmen, da sowohl die in die Flüssigkeit ein- und austretenden Schwefelsäuremengen, als auch die Mengen des entstehenden und verbrauchten Superoxydes fast genau mit diesem chemischen Schema übereinstimmen.

Wenn mit der Ladung so lange fortgefahren wird, bis freie Gasblasen an den Platten entstehen, so kommt noch die EMK der Gasausscheidung zu der Spannungsdifferenz hinzu, die zwischen schwammigem, metallischem Blei und Bleisuperoxyd besteht.

Daher kommt es, dass beim Laden bis zu starker Gasentwickelung (bis zum sogenannten Kochen oder Milchigwerden der Zellen) die Spannung der einzelnen Zellen schliesslich bis auf 2,75 V steigt, dass aber, sobald man die Ladung unterbricht, die Spannung rasch auf 2,2 V fällt.

Die Erhöhung der Ladespannung über die Spannung bei der Entladung wird aber nicht durch die Gasausscheidung an den Elektroden allein veranlasst, sondern auch die Änderungen der Säurekonzentration in der schwammigen aktiven Masse haben ihren Anteil daran. Auch das Wiederansteigen der Spannung nach Gebrauch in den darauf folgenden Ruhepausen dürfte auf den allmählichen Ausgleich der Konzentrationsunterschiede in den Ruhepausen z. T. zurückzuführen sein.

Dolezalek[1]) hat nämlich nachgewiesen, dass die EMK der geladenen Zelle mit der Erhöhung der Säuredichte merklich steigt, wie nachfolgende Tabelle zeigt:

EMK	Säuredichte	% H_2SO_4
2,29	1,496	58,37
2,18	1,415	50,73
2,05	1,279	35,82
1,94	1,140	19,07
1,82	1,028	3,91

Bei der Ladung muss sich somit der Akkumulator verhalten, als ob er mit Säure von höherer Konzentration gefüllt wäre; beim Entladen muss dagegen die Spannung um so niedriger sein, je mehr in den Poren der aktiven Masse die vorhandene Säure durch ausgeschiedenes Wasser verdünnt worden ist.

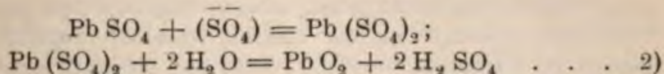
[1]) Dolezalek, Über die Abhängigkeit der EMK und des Nutzeffektes des Bleiakkumulators von der Säurekonzentration. Zeitschrift für Elektrochemie, Bd. IV (1898), S. 349.

3. Die Erklärung der chemischen Vorgänge im Akkumulator vom Standpunkte der Ionentheorie.

Vom Standpunkte der Ionentheorie hat Le Blanc die Vorgänge im Bleiakkumulator durch die Annahme erklärt, dass auch das Bleisuperoxyd (ähnlich wie im Leclanché-Element das Mangansuperoxyd) vierwertige Bleiionen in die Flüssigkeit entsendet, die bei der Entladung unter Abgabe positiver Elektrizität sich in zweiwertige Bleiionen umsetzen. Die gebildeten zweiwertigen Bleiionen verbinden sich mit den $\overset{=}{SO_4}$-Ionen zu festem Bleisulfat. An der negativen Elektrode sendet bei der Entladung das schwammige Blei zweiwertige Bleiionen in die Flüssigkeit aus, die sich, ohne einen erheblichen Potentialsprung zu veranlassen, ebenfalls mit $\overset{=}{SO_4}$-Ionen zu Bleisulfat vereinigen. Wegen Verminderung der Konzentration der vierwertigen und Vermehrung der zweiwertigen Bleiionen nimmt beim Entladen die Spannung ab und erholt sich rasch wieder, wenn man den Strom unterbricht.

Bei der Ladung sind beide Plattenarten mit Bleisulfat, das zweiwertige Bleiionen in die Flüssigkeit entsendet, bedeckt. An der Elektrode, an der die positive Elektrizität beim Laden eintritt, werden die zweiwertigen in vierwertige Bleiionen verwandelt; an der anderen Elektrode werden zweiwertige Bleiionen als schwammiges Blei ausgeschieden. Die Konzentration der zweiwertigen Bleiionen nimmt wegen der Zunahme der SO_4-Ionen ab; die Menge der $\overset{++}{\overset{++}{Pb}}$-Ionen nimmt zu, daher steigt allmählich die Spannung während des Ladeprozesses.

Auch Elbs glaubt an die Bildung vierwertiger Bleiionen in den Akkumulatoren und die Entstehung des Bleisuperoxydes durch freiwillige Zersetzung des Tetrasulfates des Bleies, etwa nach der Formel:



$$Pb\,SO_4 + (\overset{--}{SO_4}) = Pb\,(SO_4)_2;$$
$$Pb\,(SO_4)_2 + 2\,H_2O = Pb\,O_2 + 2\,H_2\,SO_4 \quad . \ . \ . \ . \quad 2)$$

In erheblich abweichender und ziemlich einfacher Weise hat Liebenow die Vorgänge im Bleiakkumulator vom Standpunkte der Ionentheorie aus zu erklären gesucht.[1])

Er weist auf Grund eigener Versuche[2]) und anderweiter Erfahrungen über die Elektrolyse der Bleisalze darauf hin, dass sich

---

[1]) Näheres in Zeitschrift für Elektrochemie, 1896, S. 420.
[2]) Ebenda, S. 653.

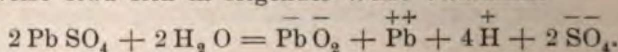
Bleiverbindungen auf mehrfache Weise in Ionen spalten können und deshalb auch $\overset{--}{PbO_2}$-Ionen und $\overset{++}{Pb}$-Ionen in der Akkumulatorenflüssigkeit vorkommen. Der zur Bildung des PbO_2 nötige Sauerstoff entstammt dem Wasser, das durch Hydrolyse zersetzt ist.

Zur Ausscheidung dieser Ionen ist bei der Ladung des Akkumulators die geringste elektrische Arbeit nötig, daher werden sich, solange die Stromdichte und damit die Spannung unter gewissen Grenzen bleibt, nur diese Ionen an den Elektroden ausscheiden. An der Kathode kommen $\overset{+}{H}$- und $\overset{++}{Pb}$-Ionen in Betracht; hier fordert das Blei die geringere elektrische Arbeit, deshalb scheidet sich zunächst nur Blei, und erst bei höheren Spannungen ausserdem auch Wasserstoff aus.

Dass PbO_2 und $PbSO_4$ in Wasser nur wenig löslich sind, begründet keinen Einwand. Eine gewisse Löslichkeit ist doch vorhanden, und die Elektrolyse von Bleisalzen hat unzweifelhaft gezeigt, dass infolge von Lösungsdissociation die oben genannten Stoffe $\overset{--}{PbO_2}$ und $\overset{++}{Pb}$ als Ionen in Lösungen vorkommen.

Ihrer geringen Menge wegen würden diese Ionen in der Lösung in der Nähe der Elektroden sehr rasch erschöpft sein, wenn nicht während des Ladeprozesses das in den Elektroden selbst noch vorhandene Bleisulfat durch Lösung immer neue Molekeln in die Flüssigkeit aussendete, die alsbald durch Hydrolyse wieder zerfallen.

Die hydrolytische Zersetzung des Bleisulfats in Ionen dürfte vorzugsweise etwa sich in folgender Weise vollziehen.

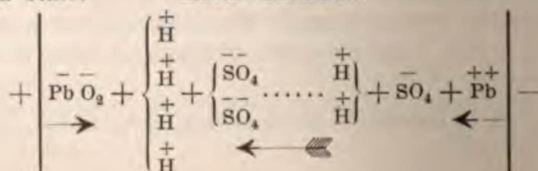


$$2\,PbSO_4 + 2\,H_2O = \overset{--}{PbO_2} + \overset{++}{Pb} + 4\,\overset{+}{H} + 2\,\overset{--}{SO_4}.$$

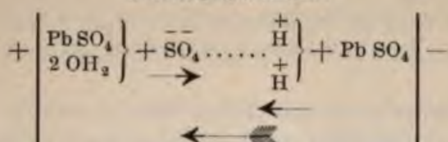
Ist am Ende der Ladung der Vorrat an löslichem Bleisulfat erschöpft und die Umsetzung in Bleisuperoxyd, beziehentlich Bleischwamm vollzogen, dann werden Hydroxyl-Ionen an der Anode und Wasserstoffionen an der Kathode ausgeschieden.

Während der oben beschriebene Vorgang sich unter Verbrauch elektrischer Energie bei der Ladung vollzieht, verläuft bei der Entladung des Akkumulators der Prozess von selbst in entgegengesetztem Sinne unter Erzeugung eines elektrischen Stromes.

Die hierbei stattfindenden Umsetzungen finden etwa nach folgendem Schema statt: erstes Stadium:



zweites Stadium:



Hierin bedeuten die dicken senkrechten Striche die Elektroden, die kleinen Pfeile die Richtung der Wanderung der Ionen, die grossen gefiederten Pfeile die allgemeine Richtung des positiven Stromes im Elektrolyten.

Dieser Anschauung Liebenows scheinen sich neuerer Zeit die meisten Elektrochemiker zuzuneigen, zumal seitdem Dolezalek[1]) durch theoretische und experimentelle Untersuchungen nachgewiesen hat, dass es sich beim Laden und Entladen des Akkumulators um einen umkehrbaren Kreisprozess nach Gleich. 1) handeln muss.

Die von Darrieus[2]) aufgestellte Theorie, dass die aktive Masse der geladenen positiven Platten aus einem Gemenge von Bleisuperoxyd (PbO_2) und Überschwefelsäure ($H_2S_2O_8$) bestehe, und dass sich bei der Entladung an beiden Platten Bleisulfat bilde, ist dadurch widerlegt worden, dass Elbs und Schönherr gefunden haben, dass sich bei den geringen Stromdichten, mit denen man in den Akkumulatoren arbeitet, nur unerhebliche Mengen von Überschwefelsäure an der positiven Elektrode bilden.

Vielleicht ist jedoch das allmähliche Zerfressen der Bleigerüste der negativen Platten auf die Wirkung ausgeschiedener Spuren von Überschwefelsäure zu setzen.

4. Physikalische Vorgänge beim Laden und Entladen.

Bei Beginn der Entladung sinkt die Spannung nach wenigen Minuten bis auf 1,94 V, und man muss aufhören, der Zelle Strom zu entnehmen, wenn die Spannung unter 1,82 V herab geht.

Wenn man Sammlerzellen mit Bleiplatten ungeladen stehen lässt, oder sie zu weit entladet, so bildet sich an der Oberfläche der Platten weisses, hartes Bleisulfat, welches unlöslich ist, den Strom nicht leitet, und das Entweichen der entwickelten Gase verhindert. Erst durch längere Zeit hindurch fortgesetztes Laden mit verhältnismässig schwachen Stromstärken gelingt es allmählich, solche Schicht zum Auflockern und Abblättern zu bringen.[3])

[1]) Dolezalek, Zeitschrift f. Elektrochemie, Bd. IV (1898), S. 349 u. s. f.

[2]) Bulletin de la Société internationale des Electriciens, 1892, S. 205.

[3]) Barber-Starkey hat vorgeschlagen, die Rückbildung solcher störender Sulfatschichten durch Zusatz einer geringen Menge Soda zur Flüssigkeit zu erleichtern (100 *g* auf 1 *l* Flüssigkeit).

Die Betrachtung der oben angegebenen Formeln zur Darstellung der chemischen Vorgänge im Akkumulator führt sofort auf eine Anzahl für die Herstellung und Behandlung der elektrischen Sammler wichtige Gesichtspunkte.

Damit der Austausch der Ionen zwischen den Überzügen der Platten und der Flüssigkeit möglichst ungehindert stattfinden kann, muss einerseits die Oberfläche der Platten so gross als möglich sein, und die Flüssigkeit zu allen, chemischen Veränderungen unterworfenen festen Bestandteilen bequem gelangen und jeder Unterschied der Säuredichte sich durch Diffusion rasch ausgleichen können.

Ferner muss bei der Ladung sowohl wie beim Entladen die Stromstärke sich in gewissen Grenzen halten, damit die entwickelten Ionen auch wirklich vollständig die vorausgesetzten Umwandlungen bewirken können. Es entstehen somit, z. B. bei der Ladung, auch in den kapillaren Zwischenräumen, zwischen den einzelnen Körnern der wirksamen Masse Gasblasen; diese treiben dann diese Masse auseinander, lockern und veranlassen sie von den als Träger und Elektrizitätsleiter dienenden Bleiplatten sich loszulösen und abzufallen.

Man muss daher darauf bedacht sein, durch passend angebrachte Öffnungen oder Kanäle den Gasen Abzugswege zu eröffnen,[1] und muss Hohlräume vermeiden, aus denen entstandenes Gas nicht zu entweichen vermag.

Da mit diesen Umwandlungen auch Volumenänderungen verbunden sind,[2] werden durch Entladungen mit zu starken Stromstärken leicht Verwerfungen der Platten, zumal der positiven, veranlasst.

Man muss bei der Konstruktion der Platten demnach darauf Rücksicht nehmen, dass die aktive Masse dauernd mit dem Bleigerüst in leitender Berührung bleibt und gleichzeitig Spielraum hat sich auszudehnen.

Bei jeder Entladung und darauf folgender Ladung werden immer tiefer liegende Schichten des als Träger der aktiven Masse und als Zuleiter der Elektrizität dienenden Bleies mit von den chemischen Prozessen ergriffen. Infolgedessen gehen mit der Zeit

---

[1]) Bei dem Akkumulator von Dannert und Zacharias (D. R. P. 84810 und 86595) sind Kanäle angebracht, die schornsteinartig die aktive Masse durchsetzen und die Gase nach oben abführen. Horizontale Rippen sind ganz vermieden, weil sie das Entweichen der Gase hindern würden.

[2]) Blei vergrössert bei seinem Übergange in Superoxyd sein Volumen erheblich. Schwammiges Blei dagegen ändert sein Volumen nicht sehr, wenn es sich in Bleisulfat verwandelt. Setzt man das Volumen der Gewichtseinheit Blei = 1 (spez. Gew. 11,4), so ist das Volumen der gleichen Gewichte für Bleioxyd = 1,21, Mennige = 1,38, Bleisuperoxyd = 1,47, Bleisulfat = 2,67.

die Platten zu Grunde; dünnere Platten werden daher rascher zerstört als dickere. Gleichzeitig vergrössern sich zumal die positiven Platten nach allen Richtungen; sie müssen also Raum haben, dies ungehindert thun zu können.

Wenn eine Platte an einer Stelle mehr als an einer anderen dem chemischen Prozesse unterworfen wird, so treten wegen der ungleichen Ausdehnung Verwerfungen der Platten ein. Die positiven Platten, bei denen, wie erwähnt, die Volumenänderung besonders stark ist, müssen daher beiderseitig negativen Platten gegenüber stehen. Jeder Bleiakkumulator hat deshalb eine negative (graue) Platte mehr, als er positive (braune) Platten besitzt. Durch isolierende Zwischenstücke, z. B. Hartgummistäbe, Glasröhren, Glasstreifen oder siebartig durchlöcherte Celluloidplatten, müssen die benachbarten Platten in unveränderlichem, durchgängig gleichem Abstande erhalten werden.

Die Aufnahmefähigkeit (Kapazität) eines Akkumulators wird um so grösser sein, je grösser die Menge der an dem chemischen Prozesse teilnehmenden, sogenannten aktiven Masse ist. Eine Bleiplatte, die mit Bleisuperoxyd oder mit Bleischwamm bedeckt ist, zeigt eine verhältnismässig um so grössere Kapazität bei hoher Stromstärke, je dünner sie ist. Da bei jeder neuen Entladung immer tiefer liegende Schichten von der Elektrolyse ergriffen werden, nimmt anfänglich die Aufnahmefähigkeit der Zellen bei fortwährendem Gebrauche mehr und mehr zu, die Lebensdauer mehr und mehr ab.

Die positiven Platten, auf welchen sich beim Laden das braune Superoxyd bildet, sind der Zerstörung mehr ausgesetzt, als die negativen Platten, weil sich grössere Volumenänderungen an ihr vollziehen.

Bei den negativen Platten vermindert sich allmählich die Porosität der Platten; die aktive Masse schrumpft mehr und mehr ein, und nimmt nicht mehr vollständig an den Umwandlungsprozessen teil. Die Folge ist nach längerem Gebrauche ein langsamer Rückgang der Kapazität der Platten.

Schliesslich zerfallen sowohl positive als negative Platten; die Lebensdauer auch der besten Akkumulatoren ist daher eine begrenzte. Die Haltbarkeit ist ein Kompromiss zwischen Kapazität und Festigkeit der aktiven Masse. Bei guter Behandlung kann man bei stationären Batterien auf eine etwa 8 bis 12 Jahre dauernde Gebrauchsfähigkeit rechnen. Für Fortbewegung von Fahrzeugen steht die Lebensdauer der Akkumulatoren erst in zweiter Linie, und die höchstmögliche Kapazität für niedrigen Preis und bei geringem Gewicht spielt die Hauptrolle.

Wenn man eine vorher normal entladene Sammlerzelle mit der vorgeschriebenen Stromstärke ladet, so steigt, je nach der Konzentration der verwendeten Füllsäure, beispielsweise bei ungefähr 2,1 V beginnend, in den ersten Minuten die Klemmenspannung rasch, erreicht nach 5 Minuten bei ungefähr 2,16 V ein vorläufiges Maximum und sinkt hierauf wieder ein wenig. Dann steigt längere Zeit hindurch die Spannung sehr langsam bis 2,2 V. Nur vereinzelt, zunächst nur an den positiven (braunen) Platten, aufsteigende kleine Gasblasen lassen erkennen, dass Strom durch die Zelle hindurch geht. Weiterhin folgt nun eine Periode rascheren Anwachsens der Spannung; während derselben findet an beiden Plattenarten eine mehr und mehr zunehmende Gasentwickelung statt. Wenn die Klemmenspannung 2,5 V überstiegen hat, ist die Gasentwickelung

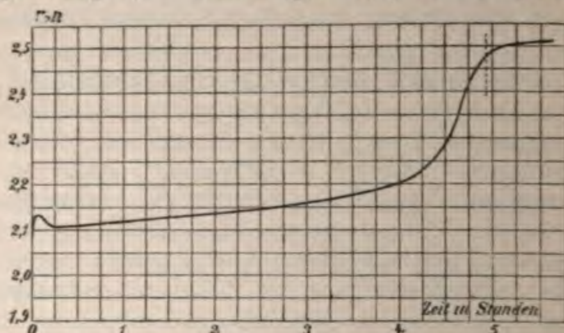


Fig. 349. Aenderung der Spannung beim Laden einer Sammlerzelle.

so heftig geworden, dass die Flüssigkeit durchgängig ein milchiges Ansehen erhält, und ihre Oberfläche wallt, als ob sich die Flüssigkeit im Kochen befände. Die Fig. 349 stellt das Anwachsen der Spannung einer Tudor-Zelle älterer Konstruktion bei Ladung mit konstanter Stromstärke dar. Da durch die rasch und massenhaft aufsteigenden Gasblasen mit der Zeit die aktive Masse gelockert und ihre Oberfläche abgewaschen wird, so unterbricht man die Ladung, ehe die Zunahme der Spannung sich wieder zu verlangsamen beginnt, ungefähr an der Stelle, die bei etwa 2,49 V Spannung in der Figur durch einen Strich angedeutet ist.

Da der innere Widerstand der Akkumulatoren sehr klein ist (er liegt schon bei kleinen Zellen unter 0,03 ω und beträgt bei grossen Zellen kaum 0,001 ω), so ist Klemmenspannung und EMK selbst bei grösseren Batterien nicht sehr voneinander verschieden.[1] Der

[1]) Bei 0,5 A Stromdichte für 1 *qdm* Oberfläche der positiven Platte beträgt der innere Widerstand für 1 *qdm* etwa 0,08 Ohm.

Die Fig. 161 (S. 260), sowie die Fig. 349 und 350 entstammen dem Werke: Heim, Einrichtung elektrischer Beleuchtungsanlagen. 3. Aufl. Leipzig, Oskar Leiner. Brosch. 10 Mk., geb. 11.50 Mk.

innere Widerstand nimmt beim Laden auf ungefähr $^1/_2$ seines anfänglichen Betrages ab und erreicht beim Entladen allmählich wieder den ursprünglichen Wert. Besonders die Bleisuperoxydelektrode zeigt bei starkem Verbrauch einen merklichen Übergangswiderstand. Da, wie die vorher (Kap. XXVIII, Abschn. 2, S. 537) mitgeteilten Formeln gezeigt haben, der Säuregehalt der Flüssigkeit beim Laden zunimmt, steigt die Dichte der Füllflüssigkeit während des ganzen Ladeprozesses. Wenn man z. B. die Batterie beim Zusammensetzen mit verdünnter, chemisch reiner Schwefelsäure von 19° Baumé (1,15 spez. Gew. bei 15° C.) gefüllt hat, so sinkt nach längerem Gebrauche die Säuredichte beim Entladen auf 18° B. (spez. Gew. 1,138) und steigt beim Laden wieder bis auf 20° B. (1,157 spez. Gew.).

Kleine Schwankungen in der Säuredichte verschiedener Zellen kommen bei jeder Batterie vor. Die oberen Schichten haben meist geringere Dichte als die unteren, die beim Laden nicht von den Gasblasen aufgerührt werden; auch die Temperatur der Flüssigkeit ist von merklichem Einfluss. Sind aber für eine Zelle die oberen und unteren Grenzen der Flüssigkeitsdichte bei normaler Ladung und Entladung einmal festgestellt, und kommen in dem Raume, in dem die Zellen untergebracht sind, keine grossen Temperaturschwankungen vor, so kann man aus dem Stande eines in die Zelle eingesenkten Aräometers, beim Laden auf den Fortschritt der Ladung, und beim Entladen auf die verfügbare Menge der aufgespeicherten Elektrizität schliessen.

Sowohl beim Laden als beim Entladen hängt die Klemmenspannung von der Stromstärke ab. Bei einer Entladung mit unveränderlicher, höchster zulässiger Stromstärke bald nach vorhergegangener Ladung findet man anfänglich die Klemmenspannung fast gleich 2 V; die Spannung sinkt in wenigen Sekunden auf ungefähr 1,94 V, um dann mit fortschreitender Entladung nur ganz allmählich weiter zu sinken. (Vergl. in Fig. 350 auf umstehender Seite die Darstellung des Entladevorganges bei derselben Zelle, deren Ladung in Fig. 349 veranschaulicht wurde.) Noch lange ehe der Energievorrat der Zelle ganz erschöpft ist, beginnt dann die Spannung rasch abzufallen. Man unterbricht zweckmässiger Weise die Entladung, nachdem die Klemmenspannung der Zelle auf 1,82 gesunken ist, ungefähr an der Stelle, die in der Zeichnung wieder durch einen Strich kenntlich gemacht ist.[1])

Die zulässige höchste Stromstärke sowohl beim Laden als beim Entladen hängt von der Oberfläche und Dicke der Platten, besonders

[1]) Bei anderen Säuredichten, als der in dem gewählten Beispiele angegebenen, ändern sich die Zahlwerte selbstverständlich um kleine Beträge.

der positiven, ab. Dieselbe ist etwas verschieden je nach der Beschaffenheit der Platten und schwankt für Akkumulatoren mit dickeren Platten zu dauerndem Gebrauche in Beleuchtungsanlagen zwischen 0,7 bis 1,3 A für 1 *qdm* bei der Ladung und 0,75 bis 1,5 A für 1 *qdm* bei der Entladung. Bei dünneren und zumal bei Grossoberflächenplatten, wie solche in Strassenbahnzellen verwendet werden, geht man mit der Stromstärke erheblich weiter.

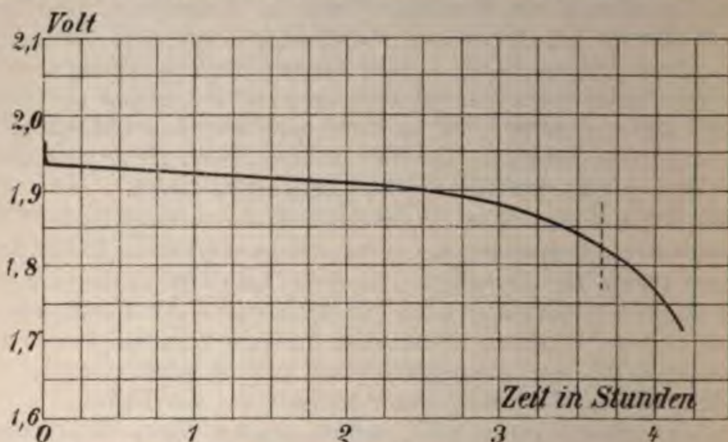


Fig. 350. Abnahme der Spannung einer Sammlerzelle beim Entladen.

Kurzdauernde Stromstösse beim Laden und bei der Entladung schaden guten Zellen nichts, selbst wenn die normale Stromstärke um das Doppelte überschritten wird.

5. Das Aufspeicherungsvermögen (die Kapazität) und der Wirkungsgrad.

Von der Menge der in einer Zelle vorhandenen wirksamen Masse und dem Grade der Beteiligung dieser Substanz an den chemischen Vorgängen hängt die Zeitdauer der Ladung und der Entladung mit den vorgeschriebenen Stromstärken oder das Aufspeicherungsvermögen der Zelle ab.

Man versteht unter Kapazität eines Akkumulators das Produkt aus Entladestromstärke und der Anzahl von Stunden, während der die Zelle diesen Strom zu geben vermag, ohne dass die Spannung der Zellen unter die zulässige unterste Grenze sinkt.

Die Kapazität wird daher in Ampère-Stunden ausgedrückt.

Wenn man den Inhalt der unter der Kurve in Fig. 349 liegenden Fläche bildet und mit der unveränderlich gedachten Stromstärke

bei der Ladung multipliziert, so erhält man in Wattstunden die in die Zelle hineingeladene elektrische Energie.

Bildet man ebenso, sofern die Entladung ebenfalls mit unveränderlicher Stromstärke erfolgt ist, das Produkt aus dem Inhalte der unter der Entladungskurve (Fig. 350) liegenden Fläche und der Entladungsstromstärke, so ergiebt sich in Wattstunden die Menge der wiedergewonnenen Energie.

Ist zu verschiedenen Zeiten mit ungleicher Stromstärke geladen oder entladen worden, so bildet man auf die angegebene Weise die Produkte für die einzelnen Zeiträume, während deren die Stromstärke ohne wesentlichen Fehler als konstant angesehen werden kann, und addiert alle diese Produkte.

Der Quotient der wiedergewonnenen und der eingeladenen elektrischen Energie giebt das wirtschaftliche Güteverhältnis, oder den Wirkungsgrad. Man erhält diese Grösse in Prozenten, wenn man den Quotienten mit 100 multipliziert.

Für alle guten Zellen beträgt dieses Verhältnis der Wattstunden, wenn man an den in den Diagrammen durch gestrichelte Linien angedeuteten Stellen die Ladung und Entladung unterbricht, ungefähr 80 bis 84 %.[1])

Folgt die Entladung unmittelbar auf die Ladung und sind beide mit unveränderlicher normaler Stromstärke erfolgt, so ist der Wirkungsgrad hinsichtlich der Wattstunden etwa 81 % und hinsichtlich der Ampèrestunden ungefähr 94 %; liegt aber zwischen Ladung und Entladung eine längere Pause von etwa 12 Stunden, so gehen die entsprechenden Zahlen auf etwa 76 % und 91 % herab.

Dividiert man die Kapazität durch das Produkt aus Dauer der Ladung in Stunden und Stromstärke bei der Ladung, so erhält man das Güteverhältnis hinsichtlich der Ampèrestunden. Dasselbe ist unter den oben angegebenen Verhältnissen ungefähr 90 bis 95 %.[2])

Die Kapazität eines Akkumulators ist in sehr erheblichem Grade von der Entladungszeit, also von der Stromstärke abhängig. Jede Preisliste einer Akkumulatorenfabrik, aber auch nachstehendes Beispiel (nach Versuchen von E. Hauswald) lässt dies deutlich erkennen.

Batteriegewicht in *kg*	Entladung in Stunden	Kapazität in Kilowattstunden
100	1	0,71
100	2	0,88
100	3	1,00
100	4	1,09
100	5	1,17

[1]) Für Zwecke der Praxis ist es ratsam, dieses Verhältnis nicht höher als 75 % anzunehmen.

[2]) Im allgemeinen gilt die Regel, dass man $^1/_9$ bis $^1/_8$ an Ampère-Stunden mehr hineinladet, als man entnommen hat.

Bezeichnet man den Energieverlust eines Akkumulators bei Ladung und Entladung mit ε, so kann man nach Versuchen von Dolezalek[1]) näherungsweise

$$\varepsilon = K \cdot i^2 \cdot t \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

setzen, wobei K eine von der Konstruktion abhängige Konstante, i die Stromstärke beim Laden und Entladen, und t die Zeit in Stunden ist. K nimmt mit wachsendem i etwas ab. Für eine alte Tudor-Batterie ist K = 0,0017, für eine alte Correns-Batterie K = 0,0008. Für die Kapazität i · t eines Akkumulators bei verschiedenen Stromstärken hat Liebenow[2]) eine Formel aufgestellt:

$$i \cdot t = \frac{K_{max}}{1 + \frac{a}{\sqrt{t}}} \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

in der i die Stromstärke, t die Zahl der Stunden, K_{max} die höchste Kapazität für $t = \infty$ bedeutet. a ist eine von der Konstruktion des Akkumulators abhängige Konstante.

Wenn man mit höheren Stromstärken als der zulässigen oberen Grenze kürzere Zeit ladet oder entladet, so nimmt in beiden Fällen der Wirkungsgrad ab, auch wenn dieselbe Energiemenge zur Ladung verwendet worden ist. Ein Teil der elektrischen Arbeit wird dann zur Bildung entweichender Gase und zur Erwärmung des Inhaltes der Zellen verbraucht. Wenn man dagegen mit schwächeren Strömen längere Zeit hindurch ladet oder entladet, so nehmen tiefere Schichten der aktiven Masse an dem Umsetzungsprozess teil und die Unterschiede in der Säuredichte in den Poren der aktiven Masse können sich besser ausgleichen; man erhält dann eine etwas grössere Kapazität und günstigere Wirkungsgrade.

Über den Einfluss der Stromdichte auf den Wirkungsgrad teilt Heim[3]) folgende Versuchsergebnisse mit:

Dauer der Entladung	3 Stunden	5 Stunden	7 Stunden
Positive Platten Stromdichte bei Entladung	1,00—1,25 A f · 1 *qdm*	0,70—0,85 A f · 1 *qdm*	0,50—0,65 A f · 1 *qdm*
Wirkungsgrad bez. auf die Amp.-Stunden	91—90 %	93—92 %	95—93 %
Wirkungsgrad bez. auf die Watt-Stunden	77—75 %	82—79 %	84—82 %

Auch Unterbrechungen durch Ruhepausen wirken ähnlich wie Verminderungen der Stromstärke. Entladungen oder Ladungen mit zu starker Stromstärke oder zu geringe Ladungen und zu starke

[1]) Zeitschrift für Elektrochemie, Bd. IV, S. 354.
[2]) Zeitschrift für Elektrochemie, Bd. IV, S. 60.
[3]) Heim, Die Akkumulatoren. Leipzig, Leiner 1897.

Entladungen machen sich noch bei mehreren nachfolgenden normalen Ladungen und Entladungen durch eine erst allmählich verschwindende Verminderung der Kapazität bemerklich.

Wenn man Zellen längere Zeit nicht benutzen will, so soll man sie nur in voll geladenem Zustande stehen lassen. Durch lokale und sekundäre Wirkungen wird aber auch dann mit der Zeit ein geringer Teil der Ladung verbraucht, so dass man gut thut, von Zeit zu Zeit (etwa alle drei bis vier Wochen) wieder bis zum raschen Anwachsen der Spannung voll zu laden.

Müssen aus irgend einem Grunde die Platten aus der Säure entfernt werden, so ladet man sie ebenfalls zuvor vollständig und verwendet beim Wiedereinsetzen Säure von genau derselben Dichte wie beim Herausheben der Platte.

Hat durch längeres Stehen im ungeladenen Zustande oder durch eine zu weit geführte Entladung eine zu starke Sulfatbildung und Verminderung der Kapazität stattgefunden, so beginnt man zunächst mit ganz geringen Stromstärken ($^1/_4$ der normalen) zu laden und führt die Ladung mit dieser Stromstärke fort, bis ziemlich die Hälfte der Kapazität eingeladen ist; dann erst führt man mit normaler Stromstärke die Ladung weiter, überladet etwas und entladet möglichst bald wieder bis zur normalen Grenze mit geringer Stromstärke und ladet sofort wieder. Wenn sich weisses, hartes Sulfat auf den Platten gebildet hat, so entfernt man dasselbe erst mit einer harten Bürste, ehe man mit der Ladung mit schwacher Stromstärke beginnt.[1]) Jeder Fehler in der Behandlung der Zellen macht sich sofort durch eine Verminderung ihrer Kapazität und einen aussergewöhnlichen Rückgang des spezifischen Gewichtes der Säure beim Entladen merklich.

6. Laden der Sammler bei gleichbleibender Spannung.

Die vorhergehenden Betrachtungen bezogen sich auf die bei stationären Batterien übliche Ladung mit gleichbleibender Stromstärke. Die Einführung des gemischten Betriebes bei Strassenbahnen (1895 Hannover, dann Dresden und Berlin und viele andere Städte), bei dem die Wagen im Inneren der Stadt durch mitgeführte Sammlerbatterien, auf den weniger verkehrsreichen Strassen jedoch durch oberirdisch zugeführten Strom fortbewegt werden, hat es nötig gemacht, dass man während der Wartezeit eines Wagens die Batterien in möglichst kurzer Zeit durch Strom nachladen musste, der den oberirdischen Leitungen entnommen wurde. Die elektrische Energie wird in solchen

[1]) Vergleiche auch das Mittel von Barber-Starkey, S. 541. Anmerkung.

und manchen ähnlichen Fällen bei nahezu gleichbleibender Spannung geliefert. Die Messung und Regelung des zugeführten Stromes durch den Wagenführer ist kaum durchführbar.

In solchen und ähnlichen Fällen ist also die Ladung der Sammlerzellen mit nahezu gleichbleibender Spannung naturgemäss notwendig.

Schon Hopkins hatte 1891 bemerkt, dass auf diese Weise eine wesentliche Abkürzung der Ladezeit und ein recht wirtschaftlicher Betrieb möglich sei. An eine Einführung der Ladung bei gleichbleibender Spannung in die Praxis konnte aber erst gedacht werden, nachdem es gelungen war, unter Anwendung der sogenannten Grossoberflächenplatten, Sammlerzellen zu konstruieren, die ohne Schaden mit Stromstärken geladen werden konnten, die die früher zulässig erscheinenden um das Mehrfache überschritten.

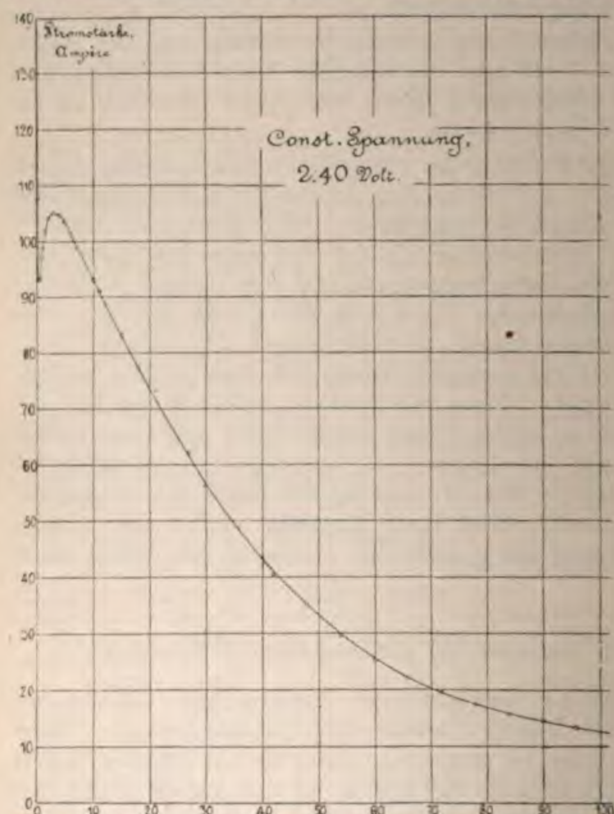


Fig. 351. Aenderung der Stromstärke beim Laden eines Akkumulators mit unveränderlicher Spannung.

Neuerdings haben sich Cahen u. Donaldson[1]) und noch eingehender Heim[2]) mit der Sache beschäftigt, und die Fragen nach der Kapazität, nach dem Wirkungsgrade und nach der Lebensdauer der mit konstanter Spannung geladenen Sammlerzellen durch lang fortgesetzte Versuchsreihen zu beantworten gesucht.

[1]) Electrician, Bd. XLI, S. 679, auszugsweise Zeitschrift für Elektrochemie, Bd. V, S. 297.

[2]) Heim, Elektrotechnische Zeitschrift 1900, S. 269 u. s. f.

Wenn man eine Zelle mit unveränderlicher Spannung ladet, so erreicht im ersten Augenblick die Stromstärke einen ausserordentlich hohen Wert, etwa den 6 bis 8fachen Betrag der für eine normale dreistündige Ladung erforderlichen Stromstärken.

Schon nach wenigen Sekunden sinkt die Ladestromstärke auf den etwa 3fachen Wert der normalen. Dieses erste relative Minimum wird je nach der angewendeten Ladespannung und der Konstruktion der Zellen etwa 30 bis 40 Sekunden nach Beginn der Ladung erreicht.

Von da an steigt die Stromstärke wieder rasch, um 2 bis 4 Minuten nach Stromschluss etwa ein zweites Maximum zu erreichen, das ungefähr dem 4 bis 6fachen Betrag der normalen Stromstärke gleichkommt. Von da an sinkt die Stromstärke stetig, anfangs rascher, später langsamer, um nach ungefähr der Hälfte der normalen Ladezeit ($1^1/_2$ Stunden) einem fast konstanten Wert sich mehr und mehr zu nähern, der etwa gleich der halben normalen Stromstärke ist.

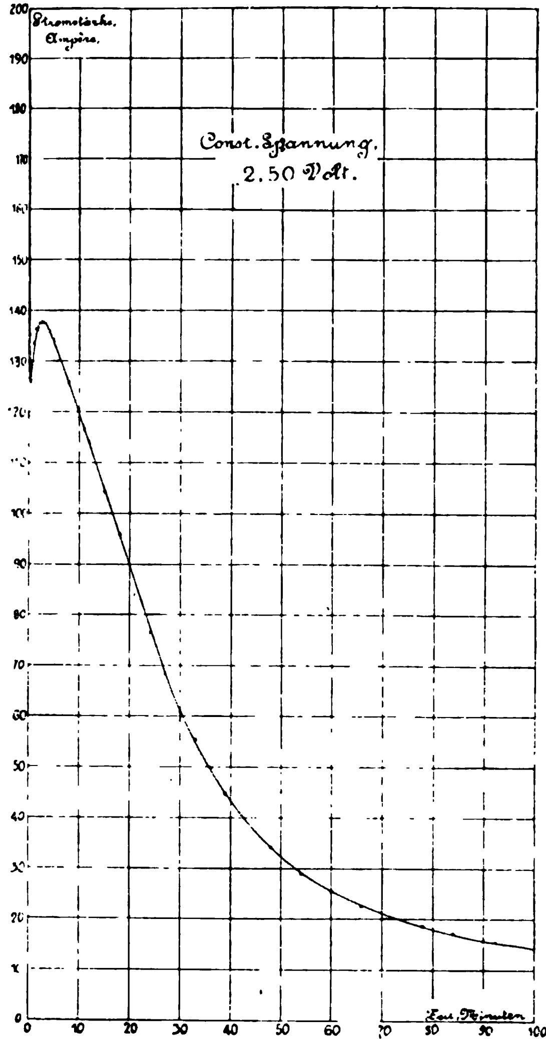


Fig. 352. Aenderung der Stromstärke beim Laden eines Akkumulators mit unveränderlicher Spannung.

Die obenstehenden Fig. 351 und 352 zeigen die Änderungen der Stromstärke während der Ladezeit; die erste Kurve bezieht sich

auf eine Ladung mit 2,40 Volt, die andere auf eine Ladung, die an derselben Zelle bei einer unveränderlichen Spannung von 2,50 Volt stattgefunden hat.

Die untersuchte Zelle enthielt 4 positive und 5 negative Platten von 260 *mm* Höhe, 118 *mm* Breite und 6 bis 7 *mm* Dicke, also hatte jede Plattenart ungefähr 24,5 *qdm* Oberfläche. Die Zelle war mit 6,85 *l* Säure von 1,151 spez. Gewicht (19° Baumé) bei 18° gefüllt worden. Die Zellen sollten normal 3 Stunden lang mit 23 bis 26 Ampère konstanter Stromstärke geladen und kürzestens in 1 Stunde mit 46 Ampère entladen werden dürfen.

Die eigentümlichen Änderungen in der Stromstärke bei der Ladung mit gleichbleibender Spannung erklären sich einesteils aus der Änderung der Säuredichte in den Poren und Hohlräumen der aktiven Masse, und anderseits aus der Erwärmung der in diesen Hohlräumen befindlichen Säure. Bei der Ladung entsteht stark konzentrierte Säure in den Poren, die dem Strom einen grossen Widerstand entgegenstellt und die EM Gegenkraft der Zelle erhöht. Dadurch wird der erste rasche Abfall der Stromstärke veranlasst. Wenn diese Säure aber nun durch Stromwärme eine höhere Temperatur annimmt, wächst dadurch ihre Leitfähigkeit, und ihre Zähigkeit (Viskosität) nimmt rasch ab, der Austausch der in den Poren enthaltenen Säure mit verdünnter Säure ausserhalb wird begünstigt. Beide Umstände aber veranlassen eine Abnahme des inneren Widerstandes der Platten und dadurch ein neues Ansteigen der Stromstärke zum zweiten Maximum. Die hieran sich schliessende dauernde Abnahme der Stromstärke wird durch das allgemeine Wachsen der Säuredichte und die Steigerung der EM Gegenkraft der Zelle erklärt; da bei geringeren Stromstärken ausserdem die Erwärmung der Säure in den Poren geringer wird, und sich allmählich durch Wärmeaustausch ein Temperaturgleichgewicht herstellt, ist ein weiteres Anwachsen der Temperatur in den Poren in den späteren Abschnitten der Ladung nicht mehr wahrscheinlich.

Schon von Beginn der Ladung an findet an den Elektroden beider Art eine schwache Gasentwickelung statt; im weiteren Verlauf der Entladung nimmt die Gasausscheidung an den positiven Platten erheblich, bei den negativen Platten aber nur wenig zu; sie erreicht aber nie die Stärke, wie bei Ladung mit unveränderlicher Stromstärke im letzten Fünftel der Ladezeit.

Bei Ladung mit konstanter Spannung bildet sich schon in den ersten Minuten um die positiven Platten herum eine trübe, rotbraune Zone von konzentrierter Schwefelsäure, die feinem Schlamm von ausgewaschenem Superoxyd ihre Färbung verdankt. Bei der nachfolgenden Entladung setzt sich dieser Schlamm zu Boden; auch wird

bei weiteren Ladungen diese Färbung immer heller, weil nach und nach der nur locker anhaftende Teil des Superoxydes ausgewaschen wird. Die bei $1^1/_2$ stündiger Ladung mit einer konstanten Spannung von 2,34 Volt erreichte Kapazität ist etwas geringer, als die Kapazität, die man bei Ladung mit gleichbleibender Stromstärke bis zur lebhaften Gasentwickelung erreicht, nämlich 75 Amp.-Stunden, wenn die Entladung unmittelbar auf die Ladung folgt, 72 Amp.-Stunden, wenn zwischen Ladung und Entladung eine Pause von 13 Stunden verstrich.

In der ersten Stunde der Ladezeit wurden ungefähr 60, in der zweiten 29, in der dritten 11 Amp.-Stunden aufgenommen.

Der Wirkungsgrad der Elektrizitätsmenge betrug bei Entladung mit rund etwa 50 Amp.-Stromstärke 99 % und der Wirkungsgrad der Watt-Stunden 81 %, wenn die Entladung unmittelbar auf die Ladung folgte; lag eine Pause von 13 Stunden zwischen Ladung und Entladung, so sanken die entsprechenden Zahlwerte auf 95 % und 75 %.

Hatte man mit 2,44 Volt statt mit 2,34 Volt geladen, so wurden in der ersten halben Stunde 72, in der zweiten 22 und in der letzten halben Stunde 6 Amp.-Stunden aufgenommen. Der Wirkungsgrad der Amp.-Stunden betrug 99 %, der der Watt-Stunden 77 %, wenn sofort nach der Ladung mit der Entladung begonnen wurde; diese Werte sanken auf 95 %, beziehentlich 74 %, wenn eine Pause von 16 Stunden zwischen Ladung und Entladung lag.

Der auf die Energiemenge bezogene Wirkungsgrad ist bei halbstündiger Ladung mit gleichbleibender Spannung von 2,4 bis 2,5 Volt für eine Zelle nicht merklich geringer, als bei $3^1/_2$ bis 4 stündiger Ladung mit konstanter Stromstärke.

Da die Kapazität der Zellen durch die scharfe Beanspruchung beim Laden mit so hohen Stromstärken nicht merklich zurück ging, Verwerfungen an den Platten nach Abschluss der Versuche nicht wahrnehmbar waren, darf man annehmen, dass die Zellen durch das Laden bei konstanter Spannung nicht erheblich gelitten hatten. Dass die Lebensdauer der Platten durch die starke Beanspruchung abgekürzt wird, ist jedoch nicht zu bezweifeln, für gewisse Fälle, z. B. die Bewegung von Fahrzeugen, spielt dies jedoch eine untergeordnete Rolle.

Für Zellen, deren Platten für rasche Entladung eingerichtet sind, wird man daher unbedenklich mit unveränderlicher Spannung oder anfänglich mit sehr viel höherer Stromstärke laden und auf diese Weise die Ladungszeit der Akkumulatoren bedeutend abzukürzen imstande sein.

In wie weit auch bei stationären Zellen, deren Platten meist dickere Schichten aktiver Masse in beiden Plattenarten tragen, die

Ladestromstärke wenigstens im Anfang der Ladezeit erhöht werden darf, ohne die Lebensdauer erheblich herabzudrücken, bedarf noch weiterer und vermutlich für jedes System besonderer Untersuchungen.

7. Die Planté-Akkumulatoren.

Einer der ersten, welchen es gelungen ist, elektrische Sammler herzustellen, die für den praktischen Gebrauch geeignet waren, ist Planté gewesen.

Er verwendete Bleiplatten von möglichst grosser Oberfläche, die er in verdünnte Schwefelsäure einsetzte. Durch häufig wiederholtes Laden und Entladen, hierauf Laden in entgegengesetzter Richtung, Entladen, Neuladen in der ursprünglichen Richtung u. s. f. gelang es ihm nach Monate langer Vorbereitung immer tiefer liegende Schichten der Bleiplatten in aktive Masse zu verwandeln, damit die Aufnahmefähigkeit zu steigern und brauchbare Akkumulatoren herzustellen.

Planté nannte diese dem Gebrauche vorhergehende elektrolytische Behandlung seiner Platten die Formierung derselben, ein Ausdruck, der sich bis auf die heutige Zeit erhalten hat und auch auf andere Arten von Akkumulatoren übertragen worden ist.

Man hat erkannt, dass reine Planté-Zellen, d. h. solche elektrische Sammler, welche aus reinen Bleiplatten mit möglichst grosser Oberfläche bestehen, für solche Fälle wenig geeignet sind, in welchen es sich um Aufspeicherung grosser Elektrizitätsmengen, um grosse Kapazität handelt, dass sie dagegen sehr geeignet sind, wenn es sich um nicht zu lange Zeit andauernde Ladungen und Entladungen mit grossen Stromstärken handelt.

Als Regler zum Ausgleich von plötzlich auftretenden Schwankungen in der Umdrehungszahl der zum Betriebe der Dynamomaschinen dienenden Motoren, wie solche als Schwankungen der Lichtstärke oder Zuckungen elektrischer Lampen in Mühlen und in Fabriken mit stark wechselndem Arbeitsbedarf nicht selten recht lästig waren, als Pufferbatterien für elektrische Strassenbahncentralen, haben sich Planté-Zellen mit sehr grosser Bleioberfläche trefflich bewährt.[1])

[1]) In welcher Weise eine Sammlerbatterie regelnd auf die Spannung einer elektrischen Lichtanlage einwirken kann, zeigt nachfolgende kurze theoretische Betrachtung: Nimmt man an, zu einer Lampengruppe, deren Widerstand W beträgt, und die mit einer gleichbleibenden Spannung E und einer gesamten Stromstärke J betrieben werden soll, sei eine Sammelbatterie parallel geschaltet, deren innerer Widerstand gleich W_1 und deren elektromotorische Gegenkraft E_1 ist. Der Widerstand der Nebenschlussdynamo, deren Strom sich zwischen den Lampen und der Regulierbatterie teilt, sei W_2, der von ihr ausgegebene Gesamt-

In Frankreich sind solche Zellen von B. de Montaud mit Erfolg in den Handel gebracht worden. Fig. 353 lässt die äussere Erscheinung der aus ihrem Gefässe herausgenommenen Platten eines de Montaud-Sammlers sehen. Die Platten selbst sind gerieft und die gleichnamigen durch kräftige Bleistreifen miteinander und mit der Klemmschraube verbunden; die ungleichnamigen Platten werden voneinander durch geschickt angebrachte kammartige Ränder aus Isolationsmaterial (Hartgummi, Celluloid) getrennt, welche gleichzeitig Verwerfungen der Platten entgegenwirken und ihnen eine grosse Festigkeit geben.

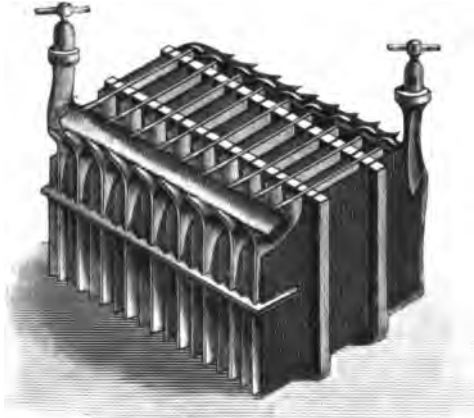


Fig. 353. Bleiplatten der Planté-Zellen nach de Montaud.

Durch ein in seinen Einzelheiten geheim gehaltenes Formierungsverfahren werden die Platten mit einer ziemlich dichten Schicht von porösem Blei bezw. Bleisuperoxyd überzogen, sodass auch die Menge elektrischer Energie, welche in diesen Zellen aufgespeichert werden kann, nicht zu gering ist. In Frankreich sind in einer Anzahl von elektrischen Beleuchtungsanlagen, in welchen für eine kürzere Zeit eine grosse Anzahl von Glühlampen gleichzeitig brennen müssen, diese elektrischen Sammler mit Erfolg zur Anwendung gekommen.

strom J_2 und ihre elektromotorische Kraft E_2. Alsdann ist nach den Kirchhoff'schen Regeln:

$$J \cdot [W_2 \cdot (W_1 + W) + W \cdot W_1] = E_2 \cdot W_1 + E_1 \cdot W_2.$$

Nimmt man nun an, dass der Widerstand der Sammlerbatterie W_1 im Vergleich zu dem äusseren Widerstande W sehr klein ist, so erhält man näherungsweise:

$$J = \frac{E_1 \cdot W_2}{W \cdot W_2} = \frac{E_1}{W}.$$

Nach dem Ohm'schen Gesetze aber ist:

$$J = \frac{E}{W}$$

und daraus folgt:

$$E = E_1.$$

Das bedeutet, dass auch, wenn E_2, die elektromotorische Kraft der Maschine, sich ändert, die Spannung, mit der die Lampen brennen, sehr angenähert gleich derjenigen der Sammlerbatterie bleibt.

Ein reiner Planté-Akkumulator älterer Form, der besonders als Aufspeicherungsapparat bei dem Löten und Schweissen auf elektrischem Wege zur Anwendung kommt, seines geringen Preises wegen aber auch zum Regeln der Spannung in elektrischen Anlagen dienen kann, deren Antriebsmaschine unregelmässig geht oder deren Strombedarf sehr grossen Schwankungen unterliegt, ist der Akkumulator von Benardos (auch Kabbath) (vergl. Fig. 354).

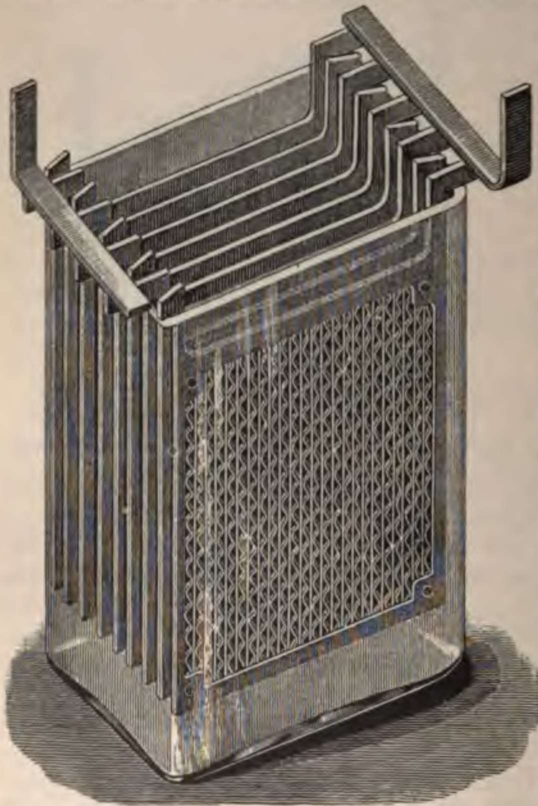


Fig. 354. Bernados- (Kabbath-) Zelle.

In Bleirahmen sind abwechselnd gerade und gewellte Bleistreifen eingelötet. Die Platten hängen mit vorspringenden Nasen auf dem Rande der mit Schwefelsäure gefüllten Glasgefässe und werden durch Glasstäbe voneinander in gleichbleibendem Abstande erhalten.

Eine andere Art Planté-Zellen hat neuerdings Epstein eingeführt. Er nimmt sowohl für die positiven als für die negativen Platten Bleiplatten, die er auf beiden Seiten mit Rippen versieht, sodass ein Querschnitt entsteht, ähnlich wie ihn die Körting'schen Heizkörper zeigen. Die Rippen und Fugen sind etwa je 1 *mm* stark, die Länge der Rippen beträgt $3^1/_2$ bis 4 *mm*, die durchgehende Mittelwand ist 3 *mm* dick.

Diese Bleiplatten werden nach einem alten Vorschlage Planté's für kurze Zeit in eine siedende, einprozentige Salpetersäurelösung eingetaucht und darin belassen, bis die Oberfläche mattgrau geworden ist. Die so behandelten Platten werden dann in gewöhnlicher Weise formiert. Nach dieser vorhergehenden chemischen Be-

handlung dauert der Formierungsprozess nur soviele Tage, als er vorher Monate beanspruchte; auch soll eine ziemlich grosse Aufspeicherungsfähigkeit erlangt werden, grösser als bei anderen Zellen des Planté-Typus. Eine Zelle, wie solche für die Fortbewegung von Strassenbahnwagen durch Akkumulatoren verwendet werden, enthielt z. B. nur eine positive und zwei negative Platten von je 22 *cm* Breite und 50 *cm* Höhe. Das Gewicht einer solchen Zelle beträgt mit Säurefüllung 20,4 *kg* und giebt nach Ladung mit 26 A Stromstärke, bei einer Entladung mit 40 A, bis zu 120 Amp.-Stunden.

Allen Planté-Zellen haftet der Nachteil an, dass sich mit der Zeit, zumal bei Erschütterungen, die mühsam hergestellte aktive Masse leicht von den Bleiplatten in Form von Blättern loslöst und dann zu Kurzschlüssen zwischen den Platten von verschiedener elektrischer Polarität und damit zur Zerstörung der Platten Anlass giebt.

8. Die Akkumulatoren mit Bleisalzen als Füllmasse. Faure-Akkumulatoren.

Um den langwierigen und kostspieligen Formierungsprozess abzukürzen, durch den Planté und seine Nachfolger auf elektrolytischem oder chemischem Wege eine Schicht aktiver Masse auf den Bleiplatten hervorzubringen suchten, und um ein grösseres Aufspeicherungsvermögen zu erzielen, überkleidete Faure Bleiplatten oder Gewebe aus Bleidrähten mit unlöslichen Bleisalzen, die er durch eine kürzer dauernde Formierung in Bleisuperoxyd und schwammiges Blei überführte.

Das Abfallen der aufgebrachten Masse von den Bleiplatten wollte er dadurch verhüten, dass er die so gebildeten Elektroden in poröse Hüllen einschloss.

Faure nahm in fast allen Staaten Patente auf seine Erfindung,[1]) würde aber kaum in der Lage gewesen sein, aus diesem Patente Nutzen zu ziehen, wenn nicht durch Sellon und Volckmar die Benutzung von Bleigittern in Vorschlag gebracht worden wäre, deren Hohlräume zur Aufnahme der teigigen Masse dienen sollten, die porösen Hüllen aber in Wegfall gebracht worden wären. Alle porösen Zwischenmittel erhöhen den inneren Widerstand der Zellen wesentlich und sind nicht geeignet eine dauernde, die Elektrizität gut leitende Verbindung zwischen der aktiven Masse und der Bleiplatte zu sichern.

[1]) D. R.-P. No. 19026 vom 8. Februar 1881.

Aus der Vereinigung der Patente der eben genannten drei Männer ist nach langen Mühen der Akkumulator der Electrical Power Storage Company in London hervorgegangen, der erste elektrische Sammler, der wirklich in grossem Massstabe in der elektrotechnischen Praxis Eingang gefunden hat.

Die Gestalt einer solchen Platte zeigt die untenstehende Fig. 355. Diejenigen Gitter nun, die späterhin als positive Platten dienen sollen, werden mit einem teigartigen Gemisch von Mennige und Schwefelsäure ausgestrichen. Für die negativen Platten verwendet man ganz ähnlich gestaltete Gitter von wenig geringerer Dicke, deren Hohlräume mit einem ebenfalls teigartigen Gemisch von Bleiglätte und Schwefelsäure ausgefüllt werden. Nach Fertigstellung wurden diese Platten einem Formierungsprozess unterworfen, indem man sie als Elektroden bei einer längere Zeit hindurch fortgesetzten Wasserzersetzung in einer verdünnten Schwefelsäurelösung verwendete.



Fig. 355. Alte Gitterplatte nach Sellon und Volckmar.

Es stellte sich jedoch bald heraus, dass auf den positiven Platten alle Bleisalze längst in Bleisuperoxyd verwandelt waren, ehe die in die negativen Platten eingetragene Masse auch nur zur Hälfte in schwammiges Blei übergeführt war. Man hat daher späterhin die Formierung der positiven und der negativen Platten in zwei Teile zerlegt. Nachdem die Formierung der positiven Platten beendet ist, werden die negativen Platten noch beinahe ebenso lange Zeit weiter als Elektroden bei einer Wasserzersetzung benutzt, während als andere Elektroden Bleiplatten von gleicher Grösse dienen.

Alle positiven Platten werden an einen dicken Bleistreifen mit dem Wasserstoffgebläse oder auf elektrischem Wege angelötet; in gleicher Weise werden alle negativen Platten mittels eines dicken Bleistreifens durch Lötung miteinander verbunden. Klammerartige Zwischenstücke aus isolierendem Materiale halten die Platten von entgegengesetzter Polarität in gleicher Entfernung und stützen dieselben.

Bei allen elektrischen Sammlern, die auf dem Grundgedanken Faure's beruhen, d. h. sich der mit Bleisalzen ausgestrichenen Blei-

gitterplatten bedienen, macht sich alsbald der Umstand störend geltend, dass zumal bei Ladung durch ziemlich starke Ströme oder auch bei Erschütterung die aktive Masse aus den Gittern herausfällt, wie dies Fig. 356 andeutet. Dadurch wird nicht nur die Aufnahmefähigkeit einer Platte wesentlich verringert, sondern die herausgefallene Masse legt sich sehr häufig auch zwischen die Platte, aus der sie sich losgelöst hat und eine benachbarte Platte von entgegengesetzter Polarität und veranlasst alsdann einen Kurzschluss, d. h. eine elektrisch leitende Verbindung von sehr geringem Widerstande, welche eine rasche und vollständige Entladung der Zelle in sich selbst unter Erwärmung zur Folge hat. Die Schwefelsäure dringt alsdann stürmisch in die poröse Füllmasse der Platten ein; diese Füllmasse dehnt sich aus und veranlasst die Platten, sich zu verwerfen, buckelig zu werden oder gar aufzureissen.

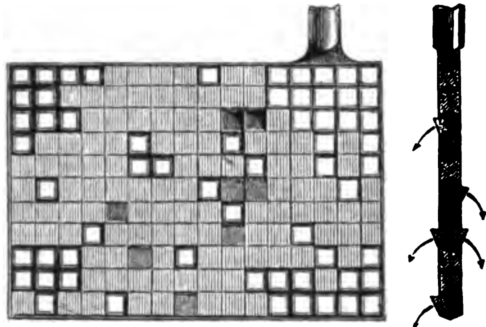


Fig. 356. Das Ausfallen der aktiven Masse.

Da nun selbst bei sorgsamer Beaufsichtigung ein solcher Unfall eintreten kann und, bis er bemerkt wird, die Zelle meist beträchtlichen Schaden erleidet, so hat man auf Mittel gesonnen, diesem Übelstande vorzubeugen.

Die Electrical Power Storage Company, deren Zellen lange Jahre hindurch zu den besten gehörten, welche auf dem Markte waren, hat diesem Übelstande dadurch vorgebeugt, dass sie die positiven und negativen Platten etwas weiter auseinander rückte, sodass, wenn aus einer Platte ein solches Würfelchen aktiver Masse ausfallen sollte, es die benachbarte Platte entgegengesetzter Polarität nicht erreichen konnte, sondern frei zwischen beiden Platten zu Boden fallen musste. Dadurch ist der Umfang der Zellen allerdings etwas grösser geworden, und der innere Widerstand hat um einen kleinen Betrag zugenommen. Um bei eintretender Neigung der Platten zum Verwerfen einer gegenseitigen Berührung der positiven und negativen Platten vorzubeugen, wurden nicht mehr, wie früher, Gummistreifen durch einzelne Öffnungen des Gitters gezogen, sondern es werden über die positiven Platten hufeisenförmige Haken aus Hartgummi gezogen. Ausserdem sind auf beiden Seiten die negativen Platten, welche etwas grösser als die positiven sind, durch kammartige Ränder aus Isolationsmasse

(Celluloid oder Hartgummi) miteinander fest verbunden; auf die hierdurch entstehenden Leisten setzen sich die etwas kleineren

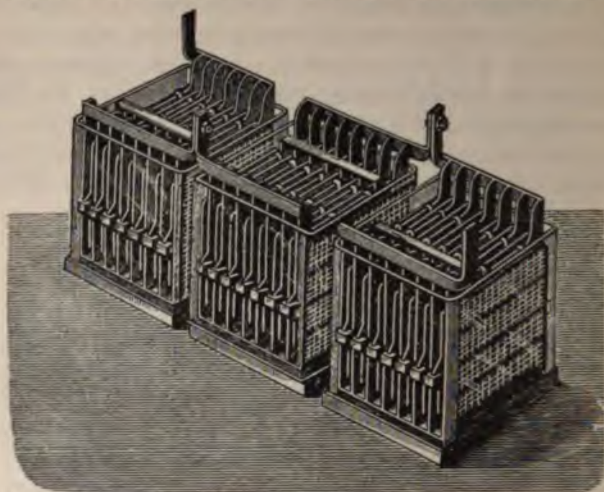


Fig. 357. Zellen von Gorham und Drake.

positiven Platten mit einem nasenartigen Vorsprung auf. Fig. 357 zeigt diese neue Form der Zellen, welche sich durch wesentlich grössere Festigkeit und Betriebssicherheit vor den älteren Formen auszeichnete und vorbildlich für viele neuere Konstruktionen geworden ist.



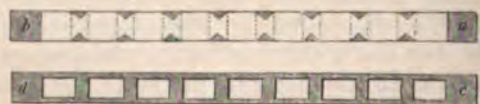


Fig. 358. Gitterplatte von Gottfried Hagen in Kalk.

Neuerdings haben die Rechtsnachfolger der Electrical Power Storage Company für die positiven Platten die Gitterform aufgegeben; sie benutzen massive Bleiplatten mit Rippen und streichen die aktive Masse in die zwischen den Rippen befindlichen Hohlräume.

G. Hagen in Kalk bei Köln verwendet für jede

Platte zwei Bleigitter mit quadratischen oder rhombischen Öffnungen, die an den Kreuzungsstellen der Stäbe durch Stege miteinander verbunden sind. Zwischen diese Gitter wird die aktive Masse von beiden Seiten her eingepresst, sodass sie bündig zur Oberfläche der Gitter zu liegen kommt. Die Form der Platten ist aus Fig. 358 zu ersehen. Die Durchschnitte längs der Linien a b und c d lassen die Gestalt der Rippen erkennen. Die oberen Ansätze, Fahnen genannt, dienen dazu, die Platten mit den Bleistreifen zu verlöten.

Die Erfahrungen mit diesen Platten, aus welchen die aktive Masse viel weniger leicht ausfallen kann, sind bisher sehr günstige gewesen.

Aus der Fig. 359 kann man die Anordnung der Platten in einer Zelle ersehen. An den Seiten der Kästen, an welchen die Schmalseiten der Platten stehen, befinden sich Platten aus Isoliermaterial mit Nuten. Die Nuten enden erheblich über dem Boden des Gefässes; auf den so entstehenden Vorsprüngen ruhen die Platten auf. Um den positiven Platten eine Vergrösserung zu ermöglichen, sind die für diese bestimmten Nuten etwas vertieft. An einer oder mehreren Stellen werden ausserdem noch die Platten durch Glasröhren auseinander gehalten. Durch eingesetzte Tafeln aus Isoliermaterial wird verhütet, dass die äusseren negativen Platten die Gefässwand berühren können. Für kleinere Zellen werden Glasgefässe oder Kästen aus Hartblei, für grössere Zellen (von etwa 200 Amp.-Std. Kapazität an) Holzkästen verwendet, die mit Blei ausgeschlagen sind.



Fig. 359. Neuere Zelle der Akkumulatorenwerke in Kalk.

In sehr sinnreicher Weise hatte Correns in Berlin den Gebrauch des Volckmar'schen Gitters abgeändert. Derselbe verwendet aus einem Stück bestehende Doppelgitter mit quadratischen Öffnungen, deren Rippen nach innen abgeschrägt sind. Beide Gitterhälften sind um eine halbe Quadratseite gegeneinander verschoben und werden durch an jeder Kreuzungsstelle befindliche Stege fest miteinander

verbunden (vergl. Fig. 360). Der Rand der Gitterplatten ist massiv und dient zur Versteifung. Die Platten werden in sehr sinnreich eingerichteten, zweiteiligen eisernen Gussformen hergestellt. Von beiden Seiten wird das aktive Material eingefüllt und durch Maschinenkraft eingepresst. Die Füllmasse ist sehr hart und fällt nicht leicht aus. In der Praxis haben sich diese Akkumulatoren recht gut bewährt; die Kapazität ist grösser als die vieler anderer Systeme, auch die Lebensdauer ist verhältnismässig hoch.

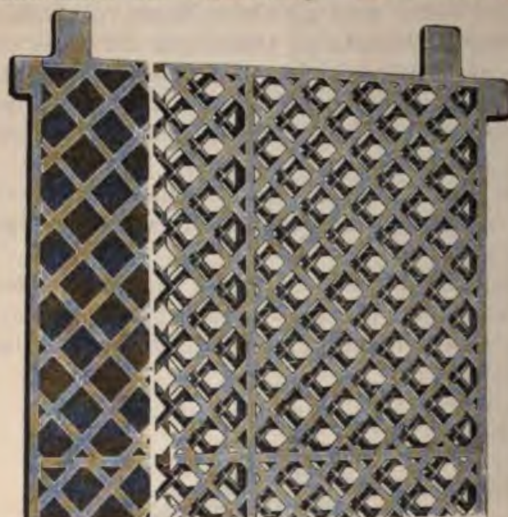


Fig. 360. Correns-Gitterplatte.

Neuerdings verwendet die Inhaberin der Correns'schen Patente, die Akkumulatoren- und Elektrizitäts-Werke, Akt.-Ges., vorm. A. W. Boese & Co. in Berlin, für stationäre Batterien als positive Platten Grossoberflächenplatten und als negative eine wesentlich abgeänderte Gitterplatte[1]) (vgl. Fig. 361). Diese neue Gitterplatte ist ohne Kern, und jede Rippe mit ihren Zacken kann sich von den benachbarten frei bewegen, sodass ein Krummziehen der Platten nicht eintritt.

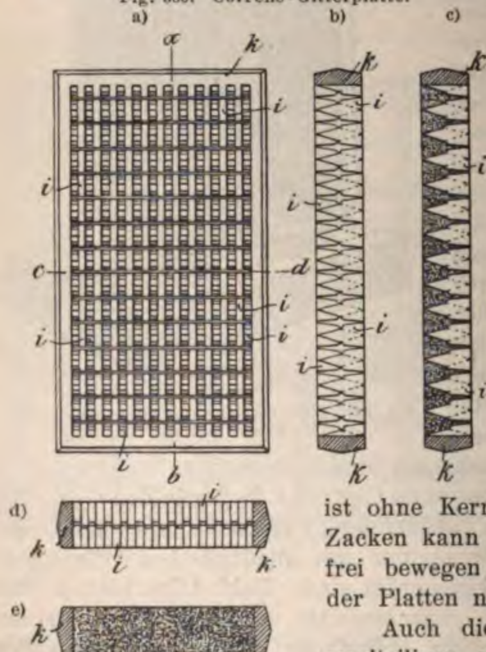


Fig. 361. Neue Gitterplatte der Akkumulatoren- und Elektrizitätswerke vorm. A. W. Boese & Co.

Auch die neuen Platten werden in zweiteiligen eisernen Dauerformen durch Guss hergestellt. Eine grosse Zahl hohler

[1]) D. R.-P. 104 243.

Dreiecke (i in den Figuren) werden so aufeinander geschichtet, dass die Spitzen der Dreiecke der einen Reihe dahin gekehrt sind, wohin bei den beiden benachbarten Reihen die Grundflächen liegen. Derartige Reihen sind in einem Rahmen (vergl. Fig. 361a) übereinander an-

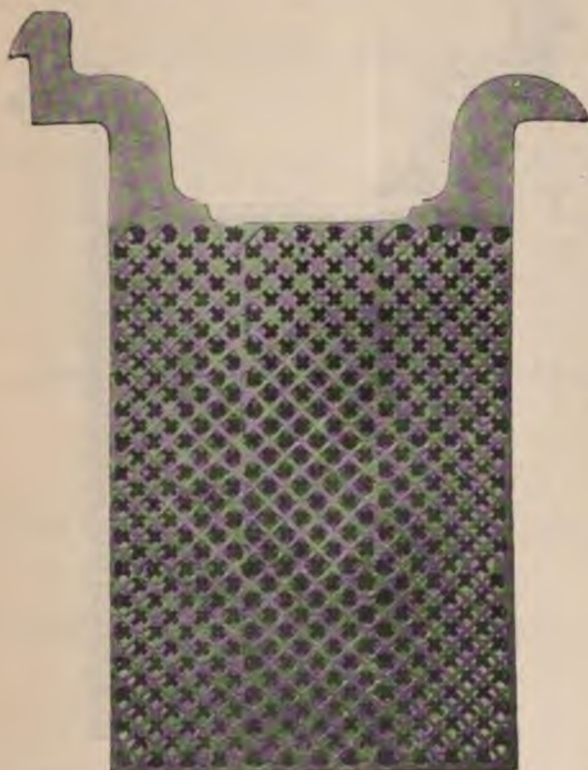


Fig. 362. Correns-Gitterplatten (negative.)

geordnet. Die Fig. 361b und c zeigen, dass die wirksame Masse von der einen zur anderen Seite durchgeht und durch zahlreiche Bleistege mit dem Rahmen leitend verbunden ist.

Fig. 361a zeigt schematisch die Vorderansicht der neuen Gitterplatte; Fig. 361b ist ein Schnitt nach der Linie ab, Fig. d ein Schnitt nach cd. Fig. c und e zeigen das Aussehen der letzterwähnten Schnitte nach Einbringung der wirksamen Masse.

Die praktische Ausführung der positiven Grossoberflächenplatten wird durch Fig. 363 erläutert.

Den Einbau der Platten in ein Glasgefäss kann man aus der Zeichnung 364 ersehen. Man erkennt, dass die Platten verschiedenen Vorzeichens durch Glasröhren GG in unveränderlichem Abstande erhalten werden, und dass die Stellung dieser Glasröhren durch an

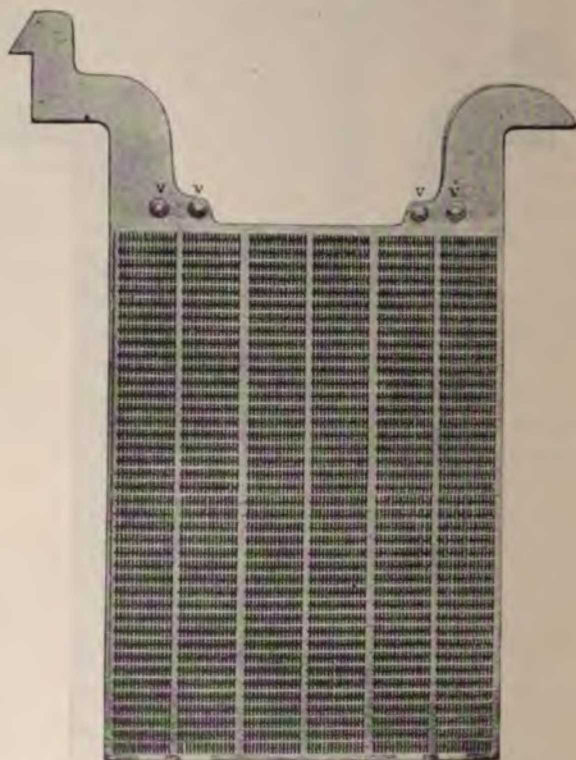


Fig. 363. Positive Grossoberflächenplatte nach D. R.-P. 104203.

die Platten angegossene Vorsprünge VV gesichert wird. Auf die Endplatten der einen Seite wirkt der Druck elastischer Hartbleifedern FF.

9. Allgemeines über Gitterplatten.

Für die negativen Platten werden von den meisten Firmen, die elektrische Sammler herstellen, z. Z. Gitterplatten mit eingestrichenen oder eingepressten Bleisalzen verwendet, und es sind eine grosse Zahl äusserst sinnreicher Plattenkonstruktionen erdacht worden. Zumeist gehen die Konstruktionen darauf hinaus, eine möglichst gute und gleichmässige Stromzuführung zur aktiven Masse zu ermöglichen,

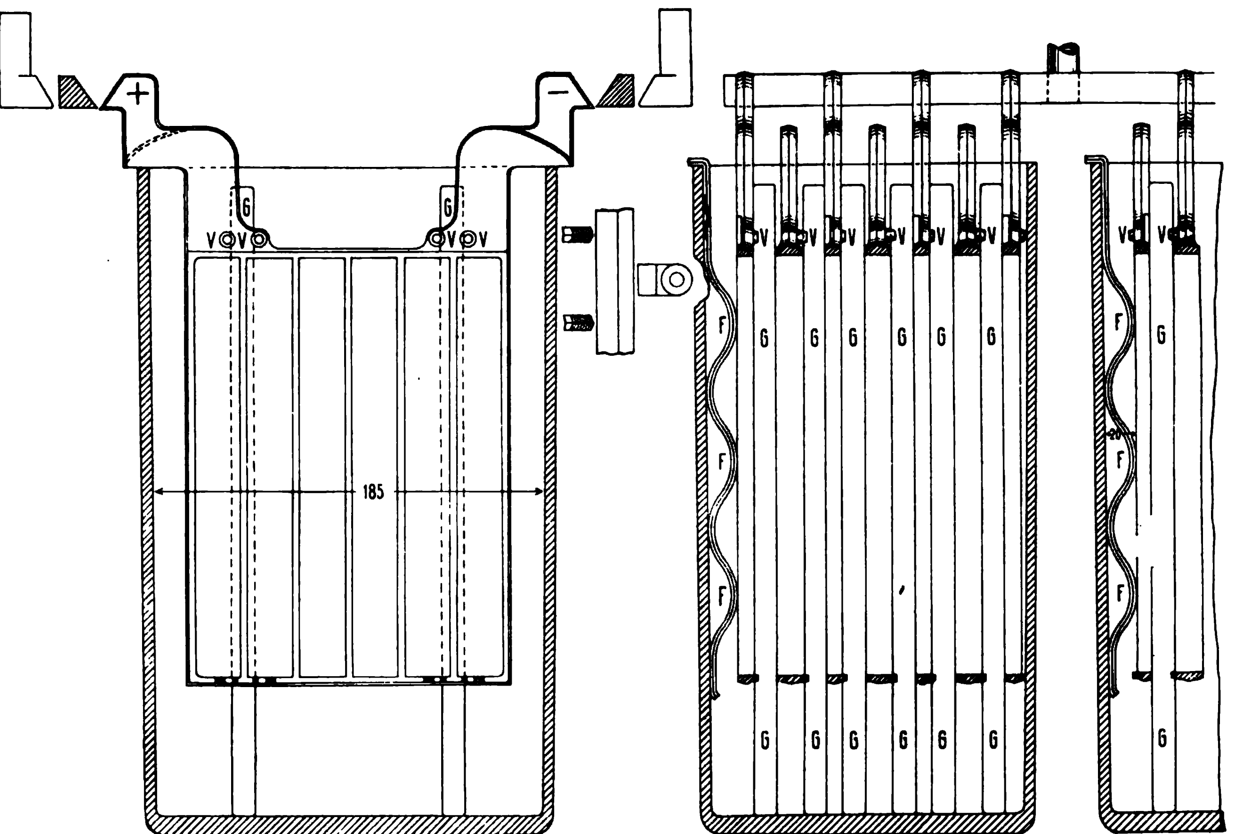


Fig. 364. Einbau der Platten in die Zellen der Akkumulatoren- und Elektrizitätswerke vorm. Boese & Co. in Berlin.

dem bei der Ladung entstehenden Gase einen guten Austritt zu gestatten und das Ausfallen der aktiven Masse aus den Gittern thunlichst zu verhindern.

Die Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft in Hagen benutzt für die negativen Platten ihrer neueren Zellen z. B. Gitterplatten, deren Bleigerüst aus durchgehenden rechteckigen Hohlräumen von ungefähr 10 *mm* Breite, wenig über 4 *mm* Höhe und ungefähr 7 *mm* Dicke besteht. Die durchgehenden Bleistreifen, welche die Wände dieser Hohlräume bilden, sind nur wenige Zehntel Millimeter dick. In der nach oben gehenden Richtung sind die horizontalen Bleistreifen in der Mitte hakenartig umgebördelt. Die Hohlräume werden vor der Formierung mit den zur Herstellung des Bleischwammes geeigneten Substanzen (in der Hauptsache Bleioxyd mit Schwefelsäure gemengt) ausgefüllt.

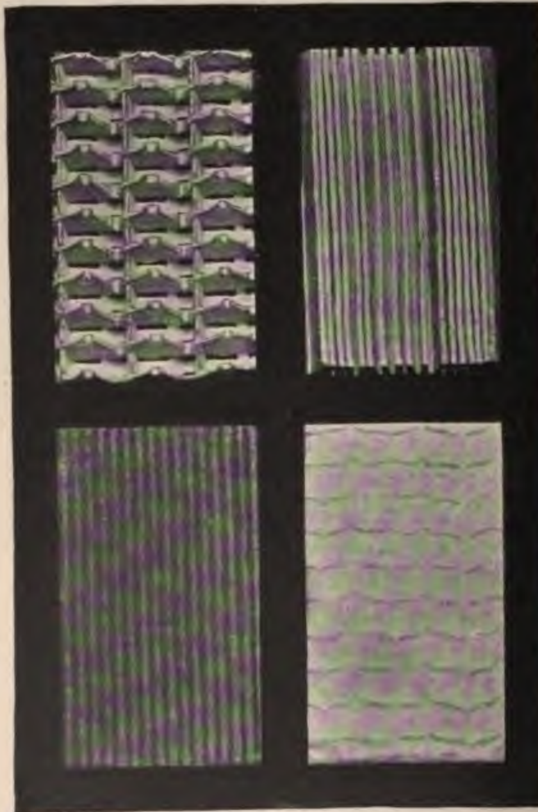


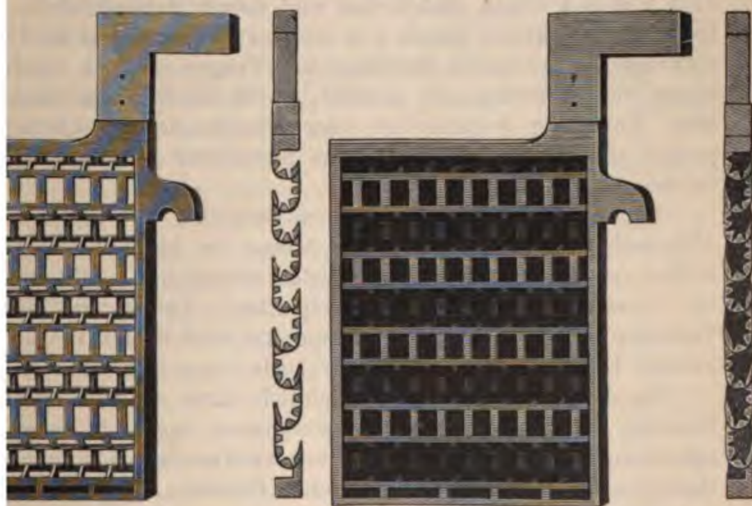
Fig. 365. Positive und negative Plattenabschnitte, ungefüllt und gefüllt, der Akkumulatorenwerke von E. Schulz in Witten a. d. Ruhr.

Ganz ähnlich sind auch die für die negativen Platten bestimmten Bleigitter der Akkumulatoren - Werke von E. Schulz, Witten a. d. Ruhr, eingerichtet, nur geht in der Mitte der Hohlräume noch eine durchlochte, dünne Bleiplatte durch.

Gegen diese Mittelplatte sind die beiderseitigen viereckigen Hohlräume derart versetzt, dass die Ecken der Zellen der einen Seite in die Mitte der Hohlräume der andern Seite der Platte fallen. Die horizontalen Bleistreifen sind zweimal nach entgegengesetzten Seiten hin hakenartig umbördelt.

Fig. 365 zeigt die Vorderseite positiver und negativer Platten-
e in ungefülltem und gefülltem Zustande. Die aktive Masse
sich in den Hohlräumen und ist in dieselben eingepresst.
positiven Platten der Schulz'schen Akkumulatoren sind in
ırichtung den alten Tudorplatten (Fig. 375) und den Gross-
enplatten anderer Firmen sehr ähnlich. Die Zwischenräume
efähr 0,5 *mm* Breite und 5 *mm* Tiefe sind jedoch mit
Iasse ausgefüllt. Die Rippen sind ungefähr 0,7 *mm* dick,
lplatte ist nur 1 *mm* stark.

der aktiven Masse eine möglichst ungehinderte Volumen-
; zu gestatten, eine recht grosse Berührung zwischen dem
renden Bleigerüst und der aktiven Masse herbeizuführen,
den Gasen ein leichtes Entweichen zu gestatten, hat die
ılatorenfabrik von Dr. Lehmann & Mann in Berlin
mit muldenförmigen Hohlräumen hergestellt, wie solche
e Abbildungen Fig. 366 und 367 in ungefülltem und durch
und 369 in gefülltem Zustande typisch dargestellt werden.



366, ungefüllt. Fig. 367. Fig. 368, gefüllt. Fig. 369.
:ten mit muldenförmigen Vertiefungen von Dr. Lehmann & Mann, Berlin.

liche Anordnungen der Platten sind auch von mehreren
Seiten vorgeschlagen und in Anwendung gebracht worden.
das Entweichen der Gase zu erleichtern und der Flüssigkeit
en Zutritt zur aktiven Masse zu gestatten, wird ausserdem
die in die Gitter eingebrachte aktive Masse noch mit einer
Zahl durchgehender Löcher oder schräg nach oben gehenden
versehen.

Zu verwerfen sind alle Gitterkonstruktionen, in welchen nach oben geschlossene, gewölbeartige Hohlräume des Bleigerüstes vorhanden sind, weil sich in solchen Räumen Gase ansammeln, durch die die leitende Verbindung zwischen der aktiven Masse und dem stromführenden Bleileiter unterbrochen wird. Wenn sich aber grössere Gasmassen in solchen Gasfängen ansammeln, drücken sie mit der Zeit die aktive Masse aus den Gittern heraus.

Um das allmähliche Zerfressen der Bleigitter durch die elektrolytischen Vorgänge im Akkumulator aufzuhalten und die Platten widerstandsfähiger zu machen, werden vielfach zur Konstruktion der Gitter Legierungen aus Blei und Antimon (etwa 4%) (Hartblei, Julienmetall) verwendet. Jedenfalls sind solche Platten etwas härter als solche aus reinem Blei. Von vielen wird dies als ein Nachteil, von anderen als ein Vorteil angesehen.

10. Die Herstellung der Füllmasse oder Paste der Akkumulatoren.

Während gerade die grössten Akkumulatorenfabriken behaupten, dass nur mit reinen Bleioxyden und reiner Schwefelsäure eine haltbare, poröse, aktive Masse von grosser Kapazität zur Ausfüllung der mannigfaltig geformten Bleigitter und Träger erhalten werden könne, haben viele Erfinder sich bemüht, durch mechanische Beimengungen oder Zufügung organischer oder unorganischer Substanzen eine poröse und doch in den Gittern festsitzende, harte, aktive Masse zu erzielen.

Schon 1879 hatte Prof. Aron versucht, die Bleioxyde in den Akkumulatoren zu einer festen Masse zu binden. Er fand, dass Kollodium mit Bleioxyden eine feste Verbindung ergab, und überzog mit derselben (Metallodium) Bleiplatten. Leider hat er aber die Versuche später nicht weiter fortgesetzt und ist (D. R.-P. 21957) zu keinem Ergebnis von praktischer Bedeutung gelangt.

Da die Bleioxyde sich hinsichtlich ihres chemischen Charakters teilweise wie Säuren, teilweise wie Basen verhalten, sind die verschiedenartigsten Verbindungen mit unorganischen und organischen Substanzen denkbar. Organische Bleisalze bilden häufig sehr feste Kitte.

Hirschwald, Schäfer und Heinemann (D. R.-P. 80420, 82787, 82792) verwenden in diesem Sinne Glycerin, angeblich mit Zusätzen von übermangansaurem Kalium, Milchsäure, Buttersäure oder Hydracrylsäure, um die Bleioxyde fest zu binden.

Glycerin verlangsamt aber sehr die Formierung, und diese ist eigentlich erst vollendet, wenn das Glycerin durch den elektrolytischen Prozess zerstört worden ist. Nach einigen Ladungen und Entladungen fliesst die aktive Masse als Schlamm aus den Gittern aus und ver-

liert schon vorher die leitende Verbindung mit dem stromführenden Bleigerüst der Platten.

Dannert und Zacharias (D. R.-P. 82798) mengen Blei oder Bleioxyde mit einer wässerigen Lösung von Chondrin- oder Glutin-Gallert, der doppelchromsaures Kali beigemengt wird.

Bezüglich der auch anderweit mehrfach (zuerst wohl von Fournier D. R.-P. 20637) vorgeschlagenen Beimengung von Mangansalzen ist inzwischen durch Versuche nachgewiesen worden,[1]) dass die Anwesenheit solcher Salze in den Bleiakkumulatoren die allmähliche Selbstentladung der Zellen begünstigt, da die im Elektrolyten gelösten Mangansalze Sauerstoff von der positiven auf die negative Elektrode übertragen.

Heinze (D. R.-P. 80201) glaubte eine widerstandsfähige, aktive Masse durch Elektrolyse organischer Bleiverbindungen herstellen zu können, die er erhielt, indem er Methyl-, Aethyl- und andere Buttersäureester mit Bleioxyden verseifte und diese Verbindungen unter Mitwirkung von Manganverbindungen elektrolysierte. Auch andere in Säure unlösliche Bindemittel, wie Harze, Firnisse, Öle, hat man verwendet. Auch mit Teerrückständen und Phenolverbindungen hat man unlösliche Verbindungen hergestellt, die zur Verkittung der aktiven Masse der Akkumulatoren dienen sollten. (Vergl. Boese D. R.-P. 78865 und D. R.-P. 93043.)

Zacharias hat z. B. auf die unlöslichen sulfosauren Salze für solche Zwecke aufmerksam gemacht.

Hübner (engl. Pat. No. 8011 vom 25. April 1895) stellt bei 80 bis 85° C. eine Schmelze her aus 1 Teil Dinitrobenzol, $^1/_4$ Mononitrobenzol, 1 Teer, $^1/_2$ Mononitrocellulose und $^1/_2$ Cellulose-Mehl, der er 1,7 Teile Bleioxyd beimengt.

Engl mengt 100 Teile Bleiglätte mit 7 Magnesiasulfat, 3 Quecksilbersalz und 35 Ammoniak (von 23° Bé.).

Dann erhärtet man die Platten durch Einlegen in Schwefelsäure und formiert in einer 3prozentigen Lösung von Magnesiumsulfat.

Die Einbringung von Stickstoffverbindungen irgend welcher Art wirkt aber nachteilig auf die Platten, da die Bleigerüste der Platten bald zerstört werden (vermutlich durch die Bildung von Salpetersäure) und die Kapazität der Zellen, die anfänglich sehr hoch ist, bald unter das normale Mass zurück geht.

Hammacher verwendet 1 Teil Phenol mit 9 Teilen Wasser und 90 Teilen Bleioxyd. Statt Phenol soll auch Kresol benutzt werden können.

C. Meissner & Co. benutzen Pflanzenalkaloide (D. R.-P. 87152), Linde (D. R.-P. 92729) Bitterstoffe, wie Aloin, Santonin.

[1]) Vergl. v. Knorre, Zeitschrift für Elektrochemie, Bd. III, S. 362.

Krecke löst Gerbsäure in kaltem destillierten Wasser und fügt 1 % Leim, Gelatine oder Albumin hinzu, rührt mit dieser Lösung die Bleioxyde an und trocknet die Platten bei 200°.

Auch der Gebrauch von Harnsäure, gemischt mit Bleicarbonat, ist empfohlen worden.

Man übersieht leicht, dass in diesen verschiedenen Vorschlägen teils die Absicht vorliegt in der aktiven Masse unveränderliche chemische Bleiverbindungen zu erzielen, die der aktiven Masse eine grössere Festigkeit geben und gleichzeitig die Leitungsfähigkeit erhöhen sollen, anderenteils scheint der Zweck dieser Beimengungen nur der zu sein, die Bleiteilchen mechanisch zu verkitten.

Über den Wert aller dieser Vorschläge kann nur die Praxis und vor allem die Zeit entscheiden. Mit reinen Bleisalzen und reiner Schwefelsäure hat man Akkumulatoren erzielt, die 8 bis 10 Jahre und länger im Gebrauch gewesen sind, ohne erheblich an Kapazität einzubüssen oder zu Störungen Anlass zu geben. Erst wenn Erfahrungen von ähnlicher Dauer mit den Zellen vorliegen, die unter Gebrauch von Beimischungen hergestellt worden sind, ist ein abschliessendes Urteil über diese Neuerungen möglich.

Schliesslich muss noch erwähnt werden, dass auch rein mechanische Beimengungen, wie Bimsstein, Asbestfäden, Koks, gelegentlich in ziemlich grossen Quantitäten verwendet werden, die den Zweck haben, durch ihre Poren den Gasen den Austritt und der Füllflüssigkeit den Eintritt in die aktive Masse zu erleichtern, und gleichzeitig durch ihre Beschaffenheit die Volumenänderungen zu begünstigen und den Zusammenhalt zu vermehren. Thatsache ist, dass negative Platten dieser Art das lästige Schrumpfen der aktiven Masse und den damit verbundenen Rückgang der Kapazität wenig oder gar nicht zeigen.

Von sehr erheblicher Bedeutung ist auch die mechanische Aufbereitung der Stoffe, die zur Herstellung der aktiven Masse verwendet werden. Der Grad der Zerkleinerung, die Gleichmässigkeit der Mischung und der Druck, mit dem die Masse in die Platten eingepresst wird, sind auf Haltbarkeit und Kapazität von grossem Einfluss.

11. Die Masseplatten oder Rahmenplatten.

Die Masseplatten bestehen aus einem Bleirahmen, der eine Platte umgiebt, die mehr oder weniger vollständig aus aktiver Masse besteht.

Aus einer passend gemengten, gut mechanisch aufbereiteten Masse aus Bleiglätte, Mennige und passenden Zusätzen lassen sich Kuchen bis zu 160 × 130 *mm* von grosser Härte herstellen. Um den Gasen den Austritt zu gestatten, müssen diese Platten von zahl-

reichen Löchern durchbohrt sein; die positiven Platten haben meist auch in der Mitte ein grösseres Loch, um Volumenänderungen der Masse zu gestatten. Die Leitungsfähigkeit gut zusammen gesetzter Massesubstanz ist ziemlich hoch, wenn auch erheblich niedriger, als die des reinen Bleies.

Da die Platten sich bei starker Beanspruchung in der Mitte weniger rasch laden und entladen, als in der Nähe des stromzuführenden Rahmens, so sind solche Platten mehr für langsame, als für rasche Entladung geeignet.

Ihre Kapazität ist wesentlich grösser, als die anderer Platten; 60 bis 100 Amp.-Stunden für 1 *kg* aktiver Masse positiver Platten sind nicht ungewöhnlich. Auf 1 *kg* Gewicht der positiven Elektroden kommt jedoch ungefähr nur $^2/_3$ dieses Wertes.

Da die Masse der negativen Platten sich mit der Zeit stark setzt oder schwindet und das Volumen der positiven Platten sich erheblich ändert, kann man nicht wohl durch Anbringungen von Bleiversteifungen eine grössere Haltbarkeit und bessere Stromzu- und Abführung erreichen. Die aktive Masse löst sich dann von dem Blei los, nimmt nicht mehr an dem chemischen Prozess teil und fällt schliesslich aus.

Hinsichtlich der Lebensdauer stehen Masseplatten den Akkumulatoren der anderen Konstruktionen nach.

Bei den Masseplatten scheinen Festigkeit und Lebensdauer einerseits und Kapazität anderseits zwei sich gegenseitig ausschliessende Eigenschaften zu sein.

Grössere Elektrodenplatten werden dadurch gebildet, dass man die Bleirahmen kleiner Platten miteinander verlötet. (Vergl. Fig. 370.)

Der Vorzug der Masseplatten ist ihre verhältnismässig hohe Kapazität im Vergleich zu ihrem geringen Gewichte.

Als Beispiel für Akkumulatoren dieser Art können die Zellen der Berliner Akkumulatoren- und Elektrizitätsgesellschaft Dr. Lehmann & Mann und die Masseakkumulatoren der Accumulatoren- und Elektrizitäts-Werke-Aktiengesellschaft vorm. W. A. Boese & Co. dienen.

Ein Hartbleirahmen von U-förmigem Querschnitt und Gestalt, wie sie Fig. 371, a, b, c, d zeigen, wird bei Lehmann & Mann völlig mit aktiver Masse gefüllt. Es werden Platten bis 197 × 160 *mm* verwendet, und zwar sind die positiven Platten 15 *mm*, die negativen 10 *mm* dick.

Eine Zelle Type P_7 von 47 *kg* Gewicht besitzt bei 70 Ampère Entladestromstärke (normale 42 A) eine Kapazität von 560 Amp.-Stunden.

Für Batterien für langsame Ladung und Entladung, z. B. für Waggonbeleuchtung, telegraphische Zwecke, für Zündung von Benzin-

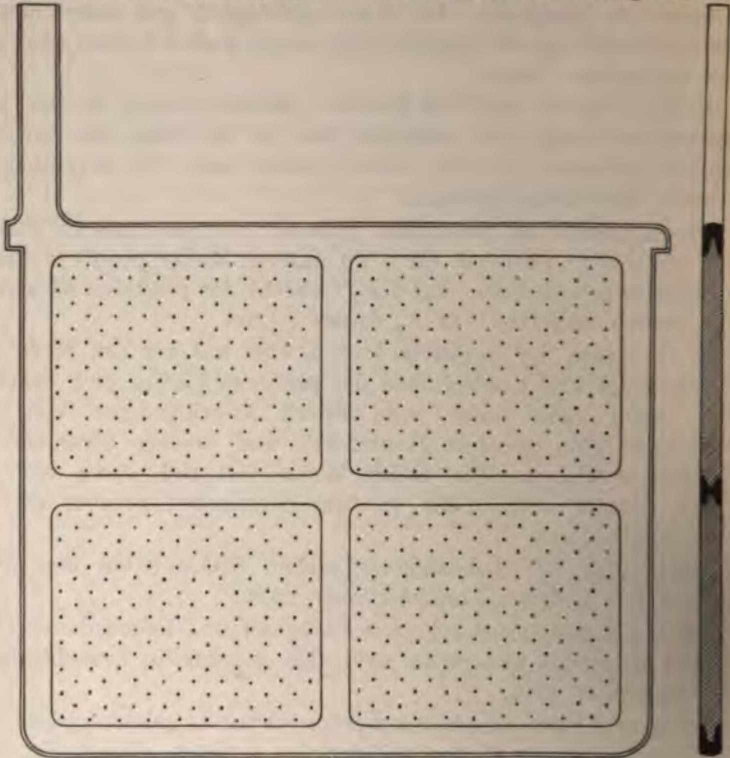


Fig. 370. Eine Masseplatte für grössere Akkumulatoren.

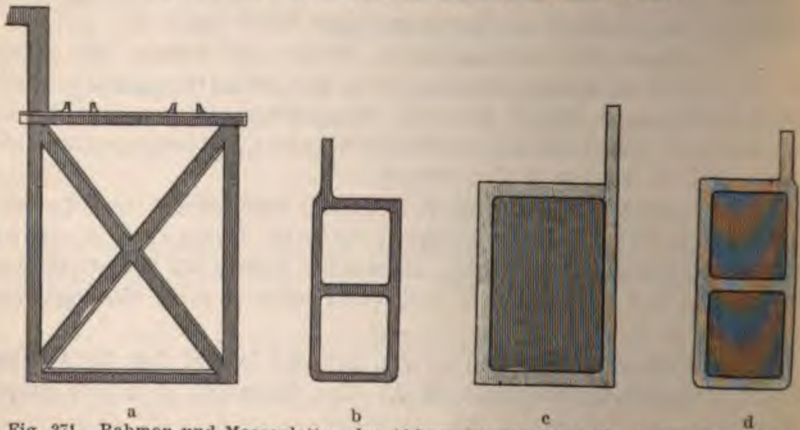


Fig. 371. Rahmen und Masseplatten der Akkumulatorenfabrik Dr. Lehmann & Mann, Berlin.

motoren der Automobil-Fahrzeuge, Grubenlampen, Handlaternen für feuergefährliche Räume verwenden die Accumulatoren- und Elektrizitäts-Werke vorm. W. A. Boese & Co. in Berlin Masseplatten des Systems Boese.

Die wirksame Masse wird (nach D. R.-P. 78865 und 93043) dadurch erhalten, dass man dem Bleioxyd mehrfach hydrooxylierte Abkömmlinge von aromatischen Kohlenwasserstoffen, die einen phenolartigen Charakter zeigen, beimengt, z. B. Karbolsäure, Kresole, Naphtole, Anthrol, Brenzkatechin oder Gerbsäuren.

Die Einrichtung der Boese'schen Masseplatten kann aus der nebenstehenden Abbildung (Fig. 373 und 374) ersehen werden.

Der Einbau der Platten erfolgt in Glas- oder Celluloidgefässe. Letztere haben sich besonders gut bewährt. In diesen erfolgt die Aufhängung der Platten auf eingeklebten Nutenrippen oder in die Gefässe eingegossene Vorsprünge, durch die gleicher Abstand der Platten ohne besondere Isolationskörper bewerkstelligt wird.



Fig. 372. Kleine Akkumulatorenzelle mit Masseplatten von Dr. Lehmann & Mann, Berlin.



Fig. 373.



Fig. 374.

Boese'sche Zellen mit Masseplatten.

Die Lötung der Plattensätze erfolgt unterhalb des Deckels, sodass sowohl vom positiven als vom negativen Plattensatz nur je eine Polausführung nötig wird. Durch einen oder auch zwei mit einem Rohre versehene Deckel, der an den Polausführungen und Rändern mit Weichgummi sorgfältig abgedichtet ist, werden die Zellen geschlossen. Das Rohr dient zum Nachfüllen von Säure und Abführen der Gase beim Laden. Beim Gebrauche der Zellen wird dieses Rohr durch einen Gummistopfen geschlossen. Fig. 373 u. 374 zeigt solche Boese'sche Zellen, eine mit unter dem Deckel gelötetem Plattensatze.

Die auf 1 *kg* Gewicht der gebrauchsfähigen Zelle bezogenen Leistungen der Boese'schen Masseakkumulatoren werden durch folgende Tabelle veranschaulicht:

Bezogen auf 1 *kg* Zellengewicht inkl. Säure	Entladung in Stunden			
	6	10	20	50
Stromstärke bei Ladung		0,921		
» » Entladung	1,315	0,921	0,59	0,296
Kapazität in Watt-Stunden	14,81	17,50	22,73	28,86
» » Amp.-Stunden	7,89	9,21	11,84	14,80

12. Die Akkumulatoren der Akkumulatorenfabrik, Aktiengesellschaft, Berlin, Fabrik in Hagen i. Westf.

Ursprünglich verfertigte diese Fabrik die sogenannten Tudor-Akkumulatoren, bei welchen die aktive Masse zwischen und auf den Rippen einer Bleiplatte sich befand, deren Querschnitt Fig. 375 und deren Gestalt die nebenstehende Fig. 376 erkennen lässt. — Die aus solchen Platten aufgebauten Zellen haben sich zumal für Beleuchtungszwecke ausgezeichnet bewährt und durch hohe Lebensdauer vor den Akkumulatoren anderer Systeme lange Jahre hindurch äusserst vorteilhaft sich ausgezeichnet.



Fig. 375. Querschnitt einer Tudor-Platte.



Fig. 376. Alte Tudor-Platte.

Der dicke Bleikern aber bedingte nicht nur ein verhältnismässig sehr grosses Gewicht, sondern auch wegen des hohen Preises des Bleies hohe Herstellungskosten.

Das Streben, das Gewicht zu verkleinern, die Kapazität im Verhältnis zum Gewicht zu vergrössern, und der Wunsch, mit verhältnismässig grossen Stromstärken laden und entladen zu können, hat allmählich zu einer vollständigen Umgestaltung der Einrichtung der Platten geführt.

Die positiven, braunen, mit Superoxyd bedeckten Platten sind reine Planté-Platten mit grosser Oberfläche, d. h. es wird keinerlei Bleisalz auf oder in diese Platten eingebracht. Die Oberflächenentwickelung derselben ist eine ganz ausserordentlich grosse. In einem Bleirahmen von mässiger Dicke sind in Abständen von ungefähr 6 *mm* dünne horizontale Rippen eingegossen, und zwischen

diesen Rippen befinden sich eine grosse Menge von dünnen vertikalen Blättern (etwa 16 auf 10 *mm*). Diese Blätter hängen oben und unten mit den horizontalen Stegen zusammen, der zwischen den Blättern befindliche Raum aber ist leer (vergl. Fig. 377 und 378.)



Fig. 377. Positive Grossoberflächenplatte der Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft, Berlin-Hagen i. W.

Die Platten werden in verschiedenen Dicken durch Guss hergestellt.

Für unbewegliche Zellen, wie solche besonders in Beleuchtungsanlagen angewendet werden, benutzt man dickere Platten; für Akkumulatoren, die zur Fortbewegung von Fahrzeugen (Strassenbahnwagen, Automobilen) dienen sollen, oder für Pufferbatterien werden dünnere Platten herge-

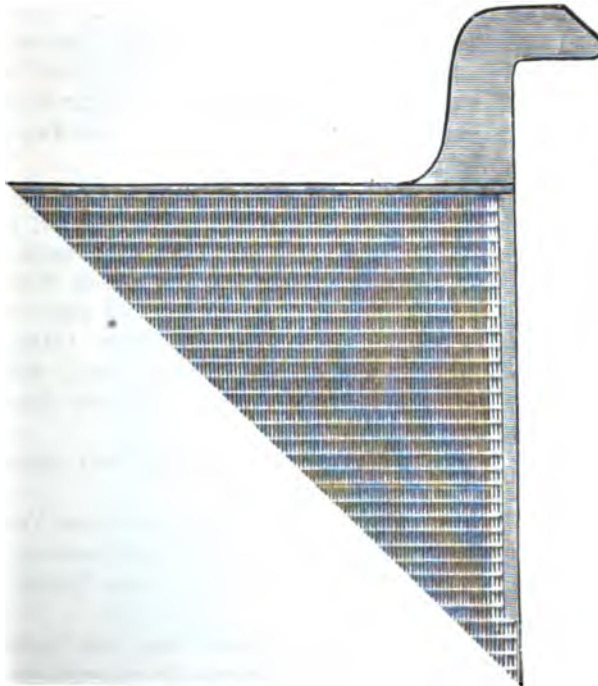


Fig. 378. Abschnitt einer positiven Grossoberflächenplatte der Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft Berlin-Hagen i. W.

stellt. Das Giessen solcher Grossoberflächenplatten mit dieser Unzahl dünner Blättchen ist geradezu ein Meisterstück der Bleigiesserei; man erhält nur tadellose Platten mit ganz reinem, oxydfreien Blei in Formen, die gerade eine bestimmte Temperatur besitzen.

Diese Platten werden durch einen mehrwöchentlichen Formierungsprozess, wie ihn schon s. Z. Planté angewendet hatte, mit einer verhältnismässig dünnen Schicht von krystallinischem Bleisuperoxyd überzogen. Dieses Bleisuperoxyd haftet so fest auf den Platten, dass selbst bei starken Biegungen die aktive Substanz nicht abblättert.

In die Zwischenräume zwischen zwei benachbarte Blättchen kann die Flüssigkeit, mit der die Zelle gefüllt ist, hineindringen und Gase, die sich bilden, können aus den zahlreichen Hohlräumen leicht entweichen. In diese engen Hohlräume hinein kann die aktive Masse sich ausdehnen. — Nach vollendeter Formierung kann man nur noch an wenigen Stellen durch die Platte hindurch sehen, weil das krystallinische Bleisuperoxyd in die Hohlräume hinein gewachsen ist, ohne sie jedoch ganz auszufüllen.

Die negativen, d. h. die mit grauem Bleischwamm überzogenen Platten sind, wie bei fast allen modernen Akkumulatoren, dünne Bleigitter, deren Hohlräume bei der Herstellung mit einem Gemisch von Bleiglätte und Schwefelsäure ausgefüllt werden. Diesem Gemisch setzt man Bestandteile zu, die dazu dienen sollen, die aktive Masse porös zu machen und das so lästige Schwinden oder Schrumpfen der negativen Masse durch Festwerden und den dadurch veranlassten Rückgang der Kapazität zu verhindern. Die Art dieses Zusatzes wird von der Fabrik geheim gehalten.

Das Gitter besteht aus durchgehenden, aneinander gereihten Hohlräumen von etwa 10 *mm* Länge, 3 *mm* Höhe und, je nach der Dicke der Platten, 4 bis 10 *mm* Tiefe. Die begrenzenden Bleistege sind sehr dünn und werden vor der Füllung durch Walzen in der Mitte etwas umgebördelt, um ein Herausfallen der aktiven Masse bei Erschütterungen zu verhindern. Die negativen Platten werden, nachdem sie gefüllt und getrocknet worden sind, meist keinem Formierungsprozesse unterworfen, sondern nur zum Hartwerden in verdünnte Schwefelsäure gestellt.

Fig. 379 zeigt eine solche Platte und Fig. 380 einen Abschnitt derselben in etwas grösserem Massstabe.

Durch Zusammenlöten mehrerer Platten mit ihren Verstärkungsrippen können Platten von ausserordentlicher Grösse hergestellt werden, sodass z. B. die grössten Zellen einen Inhalt von über 1 *cbm* besitzen.

Die Anordnung der Platten in einer Zelle, die Verbindung der gleichartigen Platten untereinander durch die angegossenen Fahnen

d angelöteten Bleileisten, die Erhaltung des Parallelismus und
s gleichen Abstandes ungleichartiger Platten durch dazwischen ge-

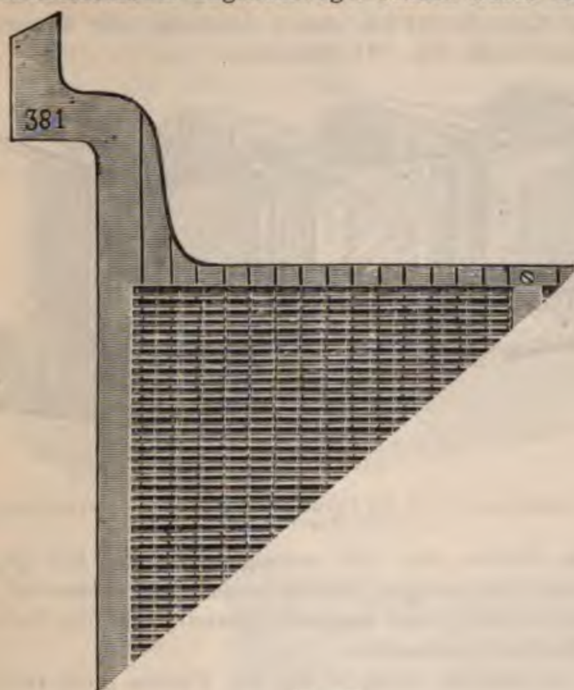


Fig. 379.

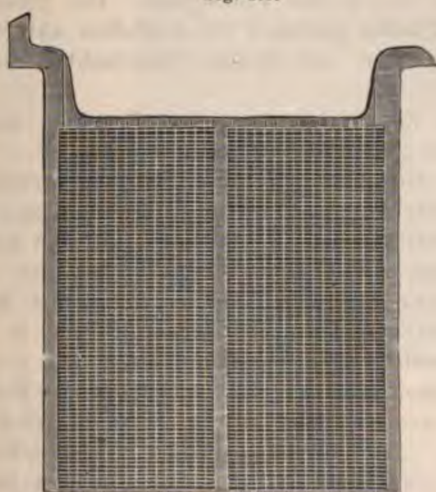


Fig. 380.

legative Platten der Akkumulatorenfabrik, Aktiengesellschaft, Berlin-Hagen i. W.

stellte Glasröhren, sowie die Befestigung dieser Röhren durch in die Platten eingegossene Nuten, überhaupt der gesamte Aufbau, der für die Erhaltung einer dauernden guten Leistung sehr wesentlich ist, lässt die nachstehende Fig. 381 erkennen.

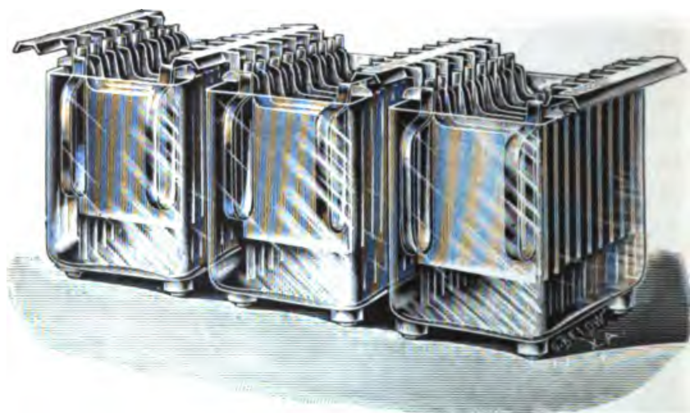


Fig. 381. Aufbau der Zellen der Akkumulatorenfabrik, Aktiengesellschaft, Berlin-Hagen i. W.

Damit die Platten sich mit mässigem Drucke fest gegen die trennenden Glasröhren anlegen, werden zwischen die äussersten Platten, und das ist beiderseitig eine negative (graue), und die Gefässwand Federn aus Hartblei geklemmt.

Um eine allmähliche Ausdehnung der Platten nicht zu hindern, hängen dieselben frei in der Flüssigkeit. Der grosse Flüssigkeitsraum unter den Platten gestattet ein Ausfallen aktiver Masse, ohne dass die Platten selbst mit diesem Staubschlamm in Berührung kommen.

Die gesamte Konstruktion ist das Ergebnis langjähriger Erfahrungen und ausgedehnter sorgfältiger Versuche.

Der leitende Gedanke der fortwährenden Verbesserungen geht dahin, vorzugsweise nur die wirksamen Substanzen: das Bleisuperoxyd auf den positiven, den Bleischwamm auf den negativen Platten der elektrolytischen Wirkung auszusetzen, und den Austausch der Flüssigkeit und das Austreten der Gase möglichst zu begünstigen.

Eine neue Strassenbahnzelle dieser Firma in Rubellitkasten Type IVA, 55, besitzt fünf negative Platten von 5 *mm* Dicke und vier positive Platten von 177 × 205 × 7 *mm*. Das Gewicht der positiven Platten samt Fahnen beträgt 6,85 *kg*, das der negativen Platten 5,23 *kg*. Zur Füllung dienen 2,6 *l* Schwefelsäure von 1,18 spez. Gew. Die Kapazität der Zelle beträgt bei einstündiger Entladung 66 Amp.-Stunden, der normale Ladestrom 45 A.

Die negativen Platten setzen sich mit ihren Rändern auf einen Vorsprung im Kasten auf, die positiven Platten besitzen oben kreisförmige Ösen. Durch diese Ösen wird ein Glasstab gesteckt, der sich auf halbkreisförmige Vertiefungen im oberen Rand der negativen Platten auflegt. Die positiven Platten schweben somit völlig frei. Zwischen je zwei benachbarten Platten befinden sich drei Glasrohre, die in Vertiefungen beider Platten eingelagert sind und dadurch auch bei Erschütterungen an ihrem Platze bleiben.

Im geladenen Zustande beträgt die Säuredichte 1,19.

13. Die Zellen der Akkumulatoren-Werke, System Pollak.

Die Pollak-Akkumulatoren bilden ein Mittelglied zwischen den reinen Planté-Zellen und den Faure-Akkumulatoren.

Für die Herstellung der Platten werden gewalzte Bleiplatten verwendet, deren Oberfläche mit zahlreichen, schrägstehenden, vierkantigen Zäpfchen von etwa 4 *mm* Länge besetzt ist. Die Zäpfchen in benachbarten Reihen sind gegeneinander versetzt (vergl. Fig. 382) und oben zu Häkchen umgebogen. Ausserdem sind noch Rippen zur Versteifung der Platten vorhanden.

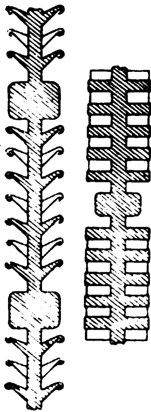


Fig. 382. Querschnitt von Platten der Pollak-Akkumulatoren.

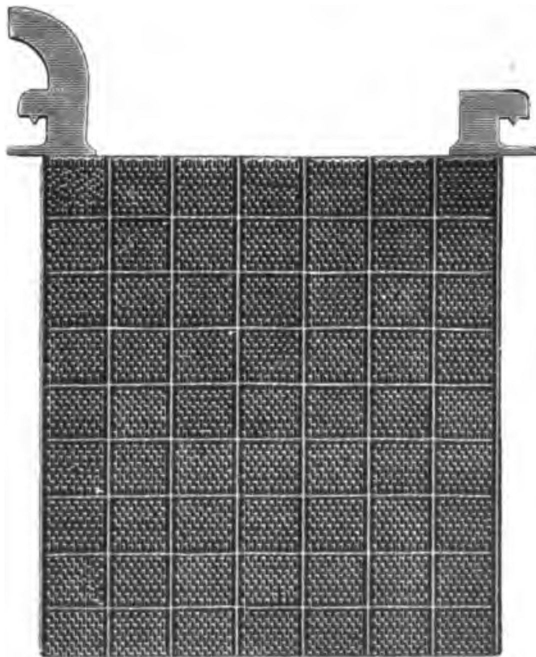


Fig. 383. Platte der Pollak-Akkumulatoren.

Zur Aufbringung der aktiven Masse auf die rohen Bleiplatten wird feinverteiltes Blei verwendet, das durch Elektrolyse aus einer

alkalischen Lösung von kohlensaurem Bleioxyd auf den Platten niedergeschlagen wird. Ausserdem wird diese Masse, die sehr fest am Bleikörper haftet, auch noch durch Walzen eingepresst. Die positiven Platten sind etwas dünner als die negativen.

Die Formierung der Platten dauert etwa 120 Stunden.

Der Zusammenbau der Zellen bietet nichts wesentlich Neues gegenüber dem, was wir schon bei Besprechung der neueren Zellen anderer Herkunft mitgeteilt haben. — Während aber die meisten Firmen die Verbindung der Fahnen der Platten mit den Bleileisten aus reinem Blei mit Hilfe einer Lötzange, unter Anwendung des Wasserstoffgebläses herstellen, werden bei den Pollak-Akkumulatoren Verbindungen aus einem leichtflüssigen Lot angefertigt, das der Einwirkung der Schwefelsäure widersteht und mit gewöhnlichen Lötlampen bearbeitet werden kann.

Bei Pollak-Akkumulatoren für kürzestens dreistündige Entladung befinden sich auf 1 *qdm* ungefähr 630 Zäpfchen, und die maximale Ladestromstärke für diese Fläche beträgt höchstens 0,72 A, die Entladestromstärke ungefähr 1 A.

Bei den Platten für rasche Entladung, wie solche in den Akkumulatorenzellen für die Fortbewegung der Strassenbahnwagen und anderer Automobilen verwendet werden, befinden sich auf 1 *qdm* Fläche beinahe 800 Zäpfchen; die Ladestromstärke für diese Fläche ist 1,3 A, die grösste Entladestromstärke 3,2 A. Der Bleikern solcher Platten wird, um das Gewicht zu erniedrigen, wesentlich dünner gemacht.

Bei einer Strassenbahnzelle Type TN4, deren Aussenmasse $9{,}8 \times 9{,}9 \times 28{,}0$ *cm* betragen, und die eine Kapazität von 40 Amp.-Stunden bei fünfstündiger Entladung besitzt, beträgt das Gewicht der vier positiven Platten nur 2,62 *kg*, das der fünf negativen nur 2,75 *kg* samt Fahnen, Bleileisten, Verbindungsstreifen etc. Die wirksame Oberfläche der positiven Platten ist 6,2 *qdm*, die normale Ladestromstärke 8 Ampère, die höchste zulässige Entladestromstärke 20 Ampère. Vorübergehende Stromstösse können den doppelten Betrag erreichen, ohne dass die Zelle Schaden leidet.

Die Platten stehen in einem Hartgummikasten und ruhen am Boden auf zwei, oben gezahnten, dreiseitigen Hartgummiprismen von 2 *cm* Höhe.

Zwischen je einer positiven und einer negativen Platte befindet sich, um eine gegenseitige Berührung gänzlich unmöglich zu machen, eine siebartig durchlöcherte, dünne Hartgummiplatte.

Die Zellen werden bei der ersten Zusammenstellung mit reiner Schwefelsäure von 1,20 spez. Gew. gefüllt; später beträgt in der ungeladenen Zelle die Säuredichte 1,13.

Oben wird die Zelle durch zwei Hartgummideckel ziemlich dicht abgeschlossen. Der untere Deckel liegt gerade auf der Flüssigkeitsoberfläche auf und hat in der Mitte ein Loch, der obere Deckel steht $1^1/_2$ *cm* darüber und besitzt ebenfalls in der Mitte ein Loch von 15 *mm* Durchmesser. Während einer Ladung bis zur Gasentwickelung bleibt das obere Loch offen, sonst wird diese Öffnung durch einen Gummipfropfen geschlossen.

Die eigenartige Herstellungsweise der Pollak-Akkumulatoren bewirkt ein festes Anhaften der aktiven Masse an den Bleikernen und ein nur sehr langsames Fortschreiten der Zerstörung des Bleikernes der positiven Platten durch Verwandlung in Peroxyd. Auch der störende Rückgang der Kapazität der negativen Platten, der meist in einer Bildung von hartem Bleisulfat an der Grenzfläche zwischen Grundplatte und Masse seine Ursache hat, ist mit Geschick bei dieser Einrichtung der Platten vermieden, da aktive Masse und Kern ganz allmählich ineinander übergehen, die aktive Substanz gewissermassen im Bleikern Wurzel fasst.

14. Die Bleistaub-Akkumulatoren der Elektrizitäts-Gesellschaft Gelnhausen.[1])

Diese nach dem System De Khotinsky hergestellten Akkumulatoren stehen zwischen den Planté- und Faure-Zellen, nähern sich aber mehr dem letzteren Typus.

Die Bänder, welche die Träger der aktiven Masse (vergl. Fig. 384) bilden, werden unter hydraulischem Drucke von 300 Atmosphären aus Blei gepresst. Die Bänder, welche endlos aus der Presse



Fig. 384.
Die Träger der aktiven Masse bei den Bleistaub-Akkumulatoren der Elektrizitäts-Gesellschaft Gelnhausen.

kommen, werden auf bestimmte Längen geschnitten und hierauf durch Angiessen der Leitungsleisten zu Platten vereinigt. Zwischen

[1]) D. R.-P. No. 35396, 70348, 86983, 82864, 88668, 58108.

den Streifen verbleiben in den Platten freie Räume, um der
flüssigkeit besseren Zutritt zu gestatten und um vor allen Di
eine ungehinderte seitliche Ausdehnung der Streifen zu ermöglic
Die Form der so entstehenden Platten ist aus Fig. 385 zu erse

Die Zwischenräume zwischen den ⊤förmigen Ansätzen der
streifen werden mit einem Gemenge ausgefüllt, das aus Bleista
und Bimssteinpulver etwa zu gleichen Volumente
besteht.

Den Bleistaub erhält man durch Einwirk
eines Dampfstrahles auf einen Strahl feuerflüssi
Bleies.

Die Beimengung von Bimsstein giebt der F
masse eine grosse dauerhafte Porosität und erh
liche Festigkeit. Nach der Füllung werden
Platten noch gewalzt.

Die positiven Platten bedürfen dann noch ein
längeren Formierung, die negativen Platten könn
sofort verwendet werden.



Fig. 385. Platte der Gelnhausener Akkumulatoren.

In den Zellen hängen die Platten mit angegossenen Nasen
Stützscheiben aus Glas und zwar so, dass sich die positiven Platt

[1]) Um s. Z. den Einsprüchen des Faure'schen Patentes zu entgehen, h
auch Correns zur Füllung seiner Gitter Bleistaub verwendet, später aber
hohen Kosten wegen dieses Verfahren aufgegeben.

auch in der Längsrichtung ungehindert ausdehnen können. Um Nebenschlüsse durch Schlammablagerungen auf den Kanten der Stützscheiben zu vermeiden, werden die Nasen der positiven Platten mit einem aus Hartgummi hergestellten Schuh umgeben.

Die Unveränderlichkeit des Abstandes der einzelnen Platten wird durch Glasröhren, die dazwischen gestellt werden, gesichert. Gegen diese Glasröhren werden die Platten durch Federn aus Hartblei angedrückt, die an den äussersten negativen Platten angebracht sind.

Die Fig. 386 stellt einen solchen Akkumulator der Type N dar, die in Glasgefässen aufgebaut wird.

Infolge der grossen Porosität der aktiven Masse überziehen sich die positiven Platten nicht mit einer dichten Schicht von Bleisulfat,

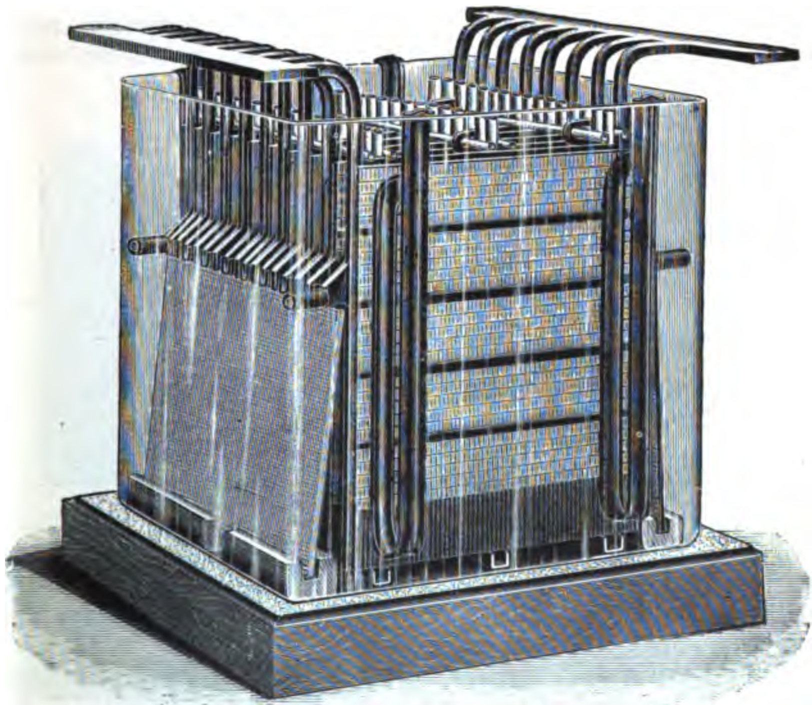


Fig. 386. Zelle der Gelnhausener Akkumulatoren.

die das Entweichen des Sauerstoffes sonst leicht hindert, und die negativen Platten zeigen nicht das lästige Einschrumpfen der aktiven Masse, durch das ein allmählicher Rückgang der Kapazität bei vielen anderen Systemen veranlasst wird.

Bleistaub-Akkumulatoren können daher mit hohen Stromstärken geladen und entladen werden; auch kann man denselben ohne

Schaden bis zur vollen Erschöpfung Strom entnehmen. Die Stromdichte beträgt bei dreistündiger Entladung 0,87 A für 1 *qdm*, bei normaler Ladung 0,75 A für 1 *qdm*. Ohne Bedenken soll man nach Angabe der Firma auch mit doppelter Stromdichte arbeiten dürfen.

15. Der Majert-Akkumulator.

Dieser von dem »Akkumulatorenwerk Oberspree A.-G.« in Ober-Schöneweide bei Berlin hergestellte Akkumulator ähnelt im Prinzip den im Abschn. 13 beschriebenen neuen Formen der Hagener Akkumulatorenfabrik.

Die negativen Platten gehören dem Faure-Typus an und haben eine Gitterplatte.

Die für Zellen zu Transportzwecken bestimmten Gitter haben schräggestellte Hohlräume (vergl. Fig. 387), die paarweise abwechselnd



Fig. 387.



Fig. 388.

Negative Platten der Majert-Akkumulatorenwerke, Oberspree A.-G.

entgegengesetzte Neigung gegen die horizontale Richtung haben. Für stationäre Batterien werden Gitter mit horizontalen Hohlräumen verwendet (Fig. 388).

Die Hohlräume verengern sich bei den Endplatten von einer Plattenseite zur anderen, bei den Mittelplatten von aussen nach der Mitte. Fig. 389 a, b und 390 stellen in vergrössertem Massstabe den Querschnitt einer Platte vor und nach der Umbördelung dar. Diese Umbördelung wird vorgenommen, um das Ausfallen der aktiven Masse zu verhindern.

Zur Füllung der Hohlräume wird ein Gemisch aus chemisch reiner Bleiglätte und Schwefelsäure verwendet, dem ein auflockernder Zusatz beigemengt wird.

Die positiven Platten des Majert-Akkumulators gehören dem
anté-Typus an; sie ähneln ausserordentlich den alten Tudor-Platten,
ır stehen die Rillen vertikal und sind ausserordentlich fein, um
ne möglichst grosse Oberfläche zu erzielen.



Fig. 389 a. b.
Majert-Platten von und nach dem Umbördeln.

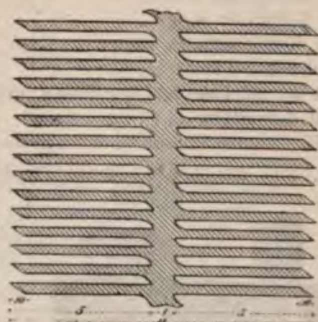


Fig. 390.
Schnitt einer positiven Platte nach Dr. Majerts Verfahren.



Fig. 391. Positive Platte der Majert-Akkumulatoren.

Die nachstehenden Zahlen geben die Massverhältnisse für diese Platten an:

	Platten für $^1/_4$- bis 1-stündige Entladung	Platten für 1- bis 3-stündige Entladung
Zahl der Rillen auf 1 *cm*	15	10
Tiefe der Rillen in *mm*	4,5	5,5
Dicke der Kernplatte in *mm*	1	1
Gesamtdicke der Platte	10	12
Verhältnis der wirksamen Oberfläche zum äusseren Inhalt der Platte	14,2	12
Gewicht für 1 *qdm* äussere Plattengrösse	660	780.

Fig. 391 zeigt die Photographie einer positiven Platte.

Die Platten werden aus Walzbleitafeln hergestellt und auf einer Hobelmaschine mit beweglichem Tisch mit Rillen versehen. Der Hobelstahl trennt einen schräg liegenden, feinen Span los, der mit seinem Fuss noch an der Platte sitzt. Der hintere, vorstehende Teil des Stahles biegt den Span auf.[1])



Fig. 392. Majert-Zelle für Fortbewegung von Fahrzeugen.

Die positiven und negativen Platten werden gesondert mit nackten Gegenelektroden formiert. Die Paste der negativen Platten enthält nämlich stets etwas Chlor. Chlorverbindungen dürfen aber nicht in den Akkumulator kommen, weil auch durch geringe Spuren die positive Platte rasch zerstört werden würde.

Für Fortbewegung von Fahrzeugen werden meist nur Zellen mit zwei negativen und einer positiven Platte verwendet. Die Platten befinden sich in einem Hartgummikasten mit Nuten; in diese Nuten werden die Platten eingesetzt. Die Fig. 392 zeigt eine solche Zelle, aus der einzelne Stücke ausgeschnitten sind, um die dahinter liegenden Teile sichtbar zu machen.

---

[1]) Näheres über die Herstellungsweise findet sich in E T Z, Bd. XX (1899), S. 784.

In Fig. 393 ist eine stationäre Majert-Zelle abgebildet.

Eine Zelle Modell 1 A_5 wiegt, mit Säure gefüllt, 18,5 *kg* und besitzt eine

Kapazität von		bei Entladung in		mit
21,5	Amp.-Stunden	1/4	Stunde	86 A
24,5	»	1/2	»	49 »
27,0	»	3/4	»	36 »
30,0	»	1	»	30 »

Bei konstanter Spannung von 2,25 Volt kann mit 120 A, bei unveränderlicher Stromstärke mit 35 A geladen werden.

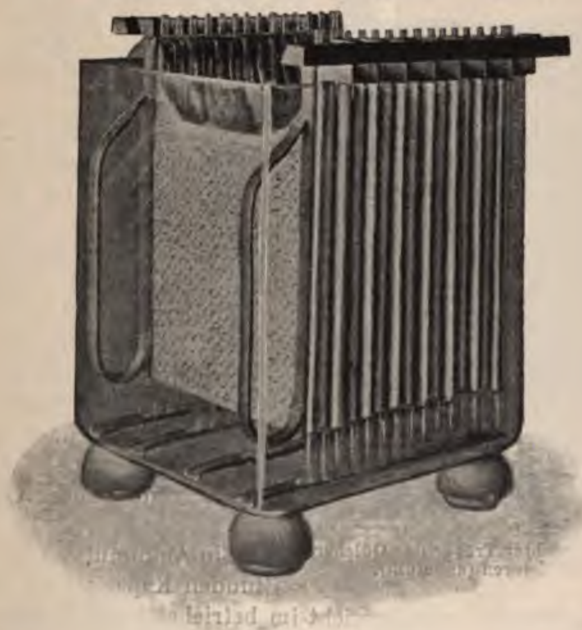


Fig. 393. Stationäre Zelle der Akkumulatorenwerke Oberspree A.-G.

16. Der Gülcher-Akkumulator.

Bei diesen eigenartigen Zellen [1]) ist der Träger der aktiven Masse ein tuchartiges Gewebe, bei dem Bleidrähte als Kette und Fäden aus feinster elastischer Glaswolle als Schuss verwendet werden. Das Gewebe wird auf Webstühlen besonderer Konstruktion durch einfachen »Tuchbund« in der Breite der Elektroden hergestellt. Nachdem ein solches Gewebe von mehreren Metern angefertigt worden ist, wird es in einzelne, der Länge der Elektroden entsprechende

[1]) D. R.-P. 80527.

Stücke zerschnitten. Hierauf werden oben und unten die Bleidrähte auf ein kurzes Stück blossgelegt und in eine Giessform eingebettet. In dieser Giessform wird um die freistehenden Bleidrahtenden und um die beiden Seiten des Gewebes ein Bleirahmen gegossen. Die Bleidrähte erhalten dadurch leitende Verbindung mit dem Rahmen.

In diese Träger, deren Form Fig. 394 zeigt, wird die aktive Masse durch ein besonderes Verfahren in fein verteiltem Zustande eingebettet. Die Platten werden mit loser Glaswolle umwickelt und zwischen Hartgummiständern in gegenseitigen Entfernungen von etwa 3 *mm* in die Gefässe eingehängt.

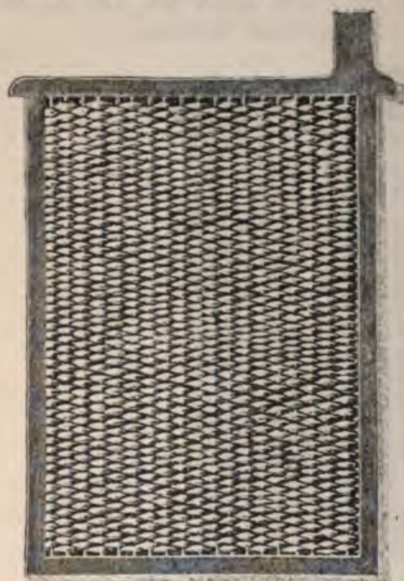


Fig. 394. Gewebter Träger der Gülcher-Akkumulatoren (ungefüllt).

Die angegossenen Fahnen der gleichnamigen Platten werden an Bleileisten angelötet, die zur Zu- und Abführung des Stromes dienen, ganz in derselben Weise, wie dies auch bei anderen Akkumulatoren geschieht.

Die Umhüllung der Platten mit Glaswolle erhöht den inneren Widerstand nicht wesentlich und hat den Vorteil, dass die Platten elastisch gegeneinander gelagert, und doch gut voneinander isoliert sind.

Ein Akkumulator für 37 Amp.-Stunden Kapazität bei 6stündiger Entladung, dessen Gesamtgewicht im betriebsfähigen Zustande 6,3 *kg* betrug, zeigte z. B. einen inneren Widerstand von 0,013 Ohm.

Die normale Stromdichte für 1 *qdm* projizierte Plattenoberfläche beträgt bei der Entladung 0,83 A, bei der Ladung 1 A; die Kapazität bei 3stündiger Entladung ist 4,4 Amp.-Stunden für 1 *kg* Gesamtgewicht der betriebsfähigen Zelle. Der Wirkungsgrad in Amp.-Stunden ist ungefähr 83%.

Zur Füllung der Zellen dient Säure von 1,20 spez. Gewicht.

Als Vorzug der Gülcher-Akkumulatoren wird angegeben, dass die Platten keinerlei Neigung zeigen, sich zu verwerfen; die aktive Masse soll weder Blasen noch Buckel bilden. Im Verhältnis zum Gewicht ist die Kapazität ziemlich gross. Da die aktive Masse auch bei starken Erschütterungen nicht ausfallen und keine Kurzschlüsse bilden kann, erscheinen diese Zellen zumal für motorische Zwecke geeignet.

17. Bleiakkumulatoren mit eingegossenen Blöcken aktiver Masse.

Um seiner Zeit nicht mit dem Inhalte des Faure'schen Patentes in Kollision zu geraten, anderseits aber auch um die positiven Platten leichter besser leitend und widerstandsfähiger zu machen, wenn sie, z. B. beim Anfahren von Strassenbahnwagen, gelegentlich mit ungewöhnlich hohen Stromstärken beansprucht werden müssen, haben verschiedene Elektrotechniker, zuerst Reckenzaun, später Fitz-Gerald und neuerdings Schöller und Jahr, auf chemischem oder elektrolytischem Wege Bleisuperoxyd in dichter, poröser, gut leitender Form hergestellt.[1]) Aus diesem Bleisuperoxyd formt man unter Anwendung von Druck und hoher Temperatur feste Platten oder Rollen und umgiesst dieselben mit Blei, sodass auf diese Weise eine Akkumulatorenplatte entsteht.

Die nebenstehende Abbildung Fig. 395 zeigt ein Stück einer solchen Platte, wie sie Reckenzaun für Akkumulatoren zum Betrieb von Strassenbahnwagen herstellte. Die kleinen, aus Bleisuperoxyd bestehenden, 4,5 *mm* dicken Cylinder c c ragen beiderseitig aus den nur 3 *mm* dicken Bleiplatten heraus und bieten der in der Zelle befindlichen Schwefelsäure eine genügende Angriffsfläche.



Fig. 395. Akkumulatorenplatte nach Reckenzaun.

Fitz-Gerald hat Blei- oder Platinplatten beiderseitig vollständig mit solchem Bleisuperoxyd umgeben und steinharte Platten auf diese Weise hergestellt. Er nennt dieselben Lithanodeplatten. Neuerdings umgiesst er derartige Platten ebenfalls mit einem Bleirahmen und vergoldet das reine Blei, um es gegen den Angriff der Säure zu schützen.

Bei Platten mit über das Blei vorstehender aktiver Masse findet der elektrolytische Prozess vorzugsweise zwischen dieser Masse und weniger zwischen den Bleirändern statt; die letzteren werden daher weniger stark angegriffen und behalten ihre Form länger unverändert, als die Ränder solcher Platten, in welchen die wirksame Masse bündig zur Oberfläche des Bleies liegt.

Bei dem Akkumulator von G. E. Heyl in Charlottenburg ist eine grössere Oxydationsfähigkeit dadurch erzielt, dass als wirksame Masse in den positiven Platten eine Blei-Chromverbindung verwendet (D. R.-P. No. 49209) wird, die nach einem eigentümlichen Verfahren

[1]) Man mischt z. B. Bleioxyd mit schwefelsaurem Ammoniak. Unter Ammoniakentwickelung bildet sich allmählich schwefelsaures Blei. Durch Zusatz von Hypochlorid oder durch Elektrolyse wird dasselbe in Bleisuperoxyd übergeführt.

hart wie Cement wird und doch hohe Porosität besitzt. Diese Masse ist in Rinnen von Bleiplatten eingebettet, die ähnlich geformt sind wie die Tudor-Platten. In der Längsrichtung der Rinnen sind jedoch mehrere Zwischenräume vorgesehen, die nicht mit aktiver Masse ausgefüllt sind, um auch eine Ausdehnung dieser Masse in der Längsrichtung zu ermöglichen und eine weitere Ursache zum Krummwerden der Platten zu beseitigen.

Die Anordnung und Aufstellung der Platten in den Zellen ist ganz ähnlich der, die wir vorher bei anderen Akkumulatoren kennen gelernt haben.

Bezüglich weiteren mehr oder minder wertvollen Konstruktionen von Akkumulatoren verweisen wir auf die zahlreichen Spezialwerke, die sich mit diesem Gegenstande befassen.[1])

18. Die Leistungen neuerer Blei-Akkumulatoren.

Nach Versuchen, die von verschiedenen Seiten angestellt worden sind, können ungefähr folgende Zahlen als Mittelwerte gelten:

a) Stationäre Zellen für etwa 300 Amp.-Stunden bei 3stündiger Entladung.

	Gitterplatten	Masseplatten
Stromstärke beim Laden (für 1 *qdm* einseitiger Plattenfläche)	1,6—0,7 A	1,1—1,0 A
Stromstärke beim Entladen (für 1 *qdm* einseitiger Plattenfläche)	1,7—0,9 A	1,8—1,0 A
Kapazität in Amp.-Stunden für 1 *kg* Plattengewicht	7,0—5,0	8,0—6,0

b) Motorzellen für etwa 150 Amp.-Stunden bei 1stündiger Entladung.

	Gitterplatten	Masseplatten	Gross-oberflächen-(Planté)-Platten
Stromstärke beim Laden (für 1 *qdm* einseitiger Plattenfläche)	1,8—1,3 A	3,2 A	6
Stromstärke beim Entladen (für 1 *qdm* einseitiger Plattenfläche)	3,0—3,4 A	3,2 A	6
Kapazität in Amp.-Stunden für 1 *kg* Plattengewicht	10	10—30	5

[1]) Ausführliche Beschreibungen der wichtigsten Akkumulatoren findet man bei Heim, Die Akkumulatoren für stationäre elektrische Beleuchtungsanlagen, 3. Aufl., Leipzig, Leiner 1899; Hoppe, Die Akkumulatoren für Elektrizität, 3. Aufl., Berlin 1898; Schoop, Handbuch der elektrischen Akkumulatoren, Stuttgart 1898; Zacharias, Die Akkumulatoren zur Aufspeicherung des elektrischen Stromes, Jena 1900.

19. Akkumulatoren aus anderen Substanzen als Blei.

Da das Patent von Faure ganz allgemein auf den Gebrauch von Bleisalzen zur Herstellung von Akkumulatorplatten lautete, war es lange Jahre hindurch schwierig eine Anordnung zu finden, welche nicht auf die eine oder andere Weise als in den Geltungsbereich dieser Patente fallend angesehen werden musste. Man hat diese Schwierigkeit dadurch zu umgehen gesucht, dass man mit anderen Metallen als Blei zu arbeiten sich bemühte.

Schon im Jahre 1882 benutzte Sutton als positive Platte amalgamiertes Blei, als negative Platte Kupfer, welches in Kupfervitriol eintauchte. Beim Laden überzieht sich die positive Bleiplatte, wie bei der Planté-Zelle, mit Bleisuperoxyd, während sich an der Kupferplatte metallisches Kupfer niederschlägt. Beim Entladen wird das Bleisuperoxyd reduziert; das Kupfer oxydiert sich und wird wieder in Kupfervitriol verwandelt. Beim praktischen Gebrauch scheinen sich aber Schwierigkeiten herausgestellt zu haben, denn man hat bis jetzt von einer technischen Verwertung dieses Gedankens nichts gehört.

Im Mai 1887 haben Commelin, Desmazure und Bailhache einen elektrischen Sammler hergestellt, dessen positive Platten aus chemisch reinem elektrolytischem Kupferstaub bestehen, der unter dem ausserordentlich hohen Druck von 600 *kg/qcm* zu einer festen, die Elektrizität leitenden, aber porösen Masse zusammengepresst wird. Als negative Elektrode dienen stark verzinnte amalgamierte Eisenplatten; das Gefäss des Sammlers besteht aus verzinntem Stahl und steht mit den verzinnten Eisenplatten in leitender Verbindung.

Als Flüssigkeit dient die Auflösung eines Zinksalzes in Pottasche. Die Kupferplatten sind mit Pergamentpapier oder mit einem dichten gewebten Stoffe umwickelt. Über den chemischen Vorgang beim Laden und Entladen gehen die Meinungen noch weit auseinander. Es scheint jedoch, dass der beim Laden in der Kupferplatte ausgeschiedene Sauerstoff sich nicht vollständig mit dem Kupfer verbindet; denn während der ganzen Dauer des Ladungsvorganges wächst das Volumen der Flüssigkeit, gerade so, als ob sie aus der Kupferplatte herausgetrieben würde. Gerade in dem Masse, als die Entladung fortschreitet, kehrt die Flüssigkeit auf ihr altes Volumen zurück. Die elektromotorische Kraft ist allerdings bedeutend geringer als die der Bleisammler; sie beträgt am Schlusse der Ladung noch nicht ganz 0,8 Volt, während Bleiakkumulatoren bekanntlich am Schlusse der Ladung eine nahezu dreimal so hohe elektromotorische Kraft besitzen.

Auch mit anderen Metallen und Salzen sind Versuche angestellt worden; im besonderen hat man die Umkehrbarkeit des elektrolytischen Prozesses des Lalande-Elementes (vergl. Kap. XXVII, Abschn. 5b, S. 521) zur Herstellung von Akkumulatoren zu verwerten gesucht.

Neuerdings soll es Edison[1]) gelungen sein, einen Kupfer-Kadmium-Akkumulator herzustellen, dem besonders geringes Gewicht und hohe Kapazität nachgerühmt wird. Da Zink wegen seiner hohen Lösungstension leicht zu lokalen Strömen durch Verunreinigung Anlass giebt, lag es nahe, das Zink durch ein Metall mit geeigneter Lösungstension zu ersetzen. —

Das Kadmium erscheint deshalb besonders geeignet, weil es in alkalischen Lösungen unlöslich ist. Die EMK der Kupfer-Kadmiumkombination ist aber sehr gering. Die Ladespannung ist erheblich höher (durchschnittlich 0,6 V) als die Entladespannung (unter 0,34 V), so dass der Wirkungsgrad niedrig sein muss.

Es würden mindestens fünf mal mehr Elemente nötig sein, um dieselbe EMK, wie bei Anwendung von Blei-Akkumulatoren zu erhalten.

Ein abschliessendes Urteil ist nicht eher möglich, als bis Genaueres über den neuen Edison-Akkumulator bekannt wird.

20. Die Kupfer-Zink-Akkumulatoren nach den Waddel-Entz-Patenten.

Von den vorher erwähnten Kupfer-Zink-Akkumulatoren sind die nach den Patenten von Waddel-Entz hergestellten nach mehreren Richtungen verschieden. Sie wurden eine Zeit lang von der Akkumulatorenfabrik, Aktiengesellschaft in Hagen i. W., zum Betriebe von Strassenbahnwagen angewendet.

Die Fig. 396 zeigt die Gestalt der Anode. Dieselbe ist aus Kupferdraht a a hergestellt, der mit einem Netzwerk von Kupferdraht überzogen ist. In dieses Netzwerk werden grosse Mengen Kupferoxyd eingebettet. Um die Gestalt der Anode zu erhalten, ist dieselbe aussen mit einem als Rahmen dienenden isolierten Drahte b b umgeben. Ebenso sind zwei hufeisenförmige Klammern c c auch aus isoliertem Drahte über die Platten geschoben. Der zur Umrahmung dienende Draht ist unten (bei b^2) ausgebogen und dient somit der Platte gleichzeitig als Fuss.

Die Isolation der Drähte b und c ist dadurch bewerkstelligt, dass diese Drähte mit Baumwolle umwickelt sind, die mit Kalk und Wasserglas getränkt ist. In einer kalihaltigen Lösung erstarrt diese Mischung

[1]) Zeitschrift für Akkumulatoren- und Elementekunde, 1901, Heft 6.

er steinharten Masse, die vorzüglich isoliert und ganz unbiegsam Jede positive Platte ist mit Baumwolle umgeben, um ein Ab- der wirksamen Masse zu verhüten.

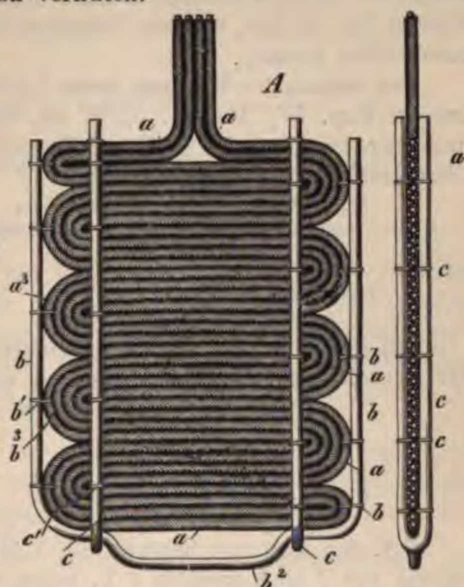


Fig. 396. Anode eines Kupfer-Zink-Akkumulators.

)ie negativen Platten, auch hier jede Zelle nehr enthält, als po- Platten vorhanden sind, ıen aus Stahlblech, mit einem eisernen gewebe überzogen ist. latten stehen in einem tahlblech hergestellten se, von dem sie durch tstücke isoliert sind. gleichnamigen Platten n ähnlicher Weise mit ler verbunden, wie uch bei anderen Akku- oren der Fall ist. Die platten tragen Glas- n, die dazu dienen, die en ungleichnamiger ität voneinander zu en und in gleichem Ab- e zu erhalten. Als olyt dient Zink-Kali- ; die Zellen müssen um zu verhüten, dass die Kohlensäure der mit der Kalilauge ver- t, luftdicht verschlossen n. Die Form der nega- und positiven Platten aus nebenstehender 397, a und b ersehen n.

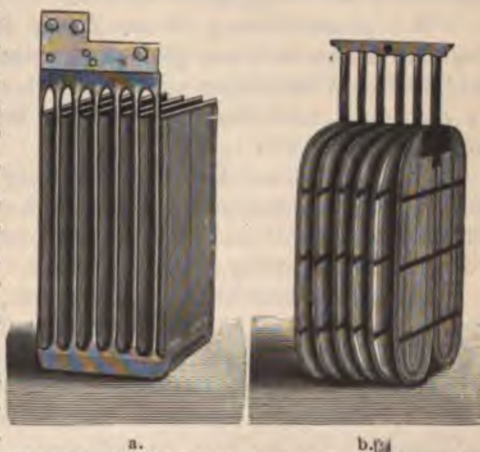
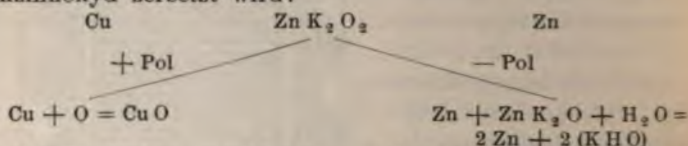


Fig. 397. Negative (a) und positive (b) Platten des Kupfer-Zink-Akkumulators.

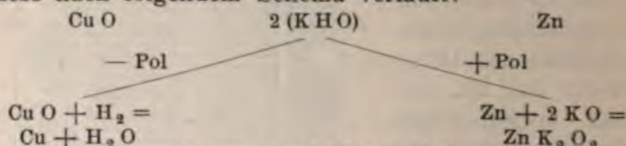
Bei dem Ladeprozess let sich aus der Zink- uge Zink auf den Eisen- n aus, und das Kupfer oxydiert. Um die gkeit in kräftige Bewegung zu versetzen, werden die Zellen Laden von unten her auf ungefähr 60° C. erhitzt. Beim Ent- löst sich das Zink wieder auf, und das Kupfer wird reduziert.

Die Einzelheiten des chemischen Vorganges beim Laden und Entladen sind nicht genau bekannt; im allgemeinen dürfte der chemische Prozess ziemlich ähnlich dem sein, den wir in Kap. XXVII, Abschn. 5b, S. 521, bei dem Elemente von Lalande und Chaperon beschrieben haben.

Der chemische Vorgang beim Laden lässt sich nach der von uns in Kap. IV, Abschn. 5, S. 90, eingeführten Darstellungsweise ungefähr in folgender Weise auffassen, wenn man annimmt, dass Dikaliumzinkoxyd zersetzt wird:



Bei der Entladung wird vermutlich Kalilauge zersetzt, sodass der Prozess nach folgendem Schema verläuft:



Bei der Ladung beginnt die EMK jeder einzelnen Zelle bei nahezu 0,9 V und erreicht 1 V, wenn die Ladung beendet ist; beim Entladen beginnt die Spannung bei ungefähr 0,88 V und sinkt allmählich bis wenig unter 0,85 V.

Der grosse Vorzug dieser Zellen für den Strassenbahnbetrieb liegt besonders in ihrem geringeren Gewichte; bei gleicher Leistungsfähigkeit in Wattstunden verhält sich das Gewicht einer solchen Zelle zu dem eines nach dem Faure-Patent hergestellten Bleiakkumulators ungefähr wie 0,55 : 1.

Ferner wird als besonderer Vorzug gerühmt, dass man diese Zellen, ohne denselben Schaden zu thun, mit wesentlich grösseren Stromstärken laden und entladen kann, als dies bei Bleiakkumulatoren von gleicher Leistung angängig ist.

Die vorstehende Abbildung, Fig. 397, bezieht sich auf eine Zelle, die bei 14 *kg* Gesamtgewicht, 32 *cm* Höhe, 20,5 *cm* Länge und 11 *cm* Breite eine Kapazität von 250 Amp.-Stunden besitzt.

88 solche Zellen dienen dazu, mit ihrer Ladung einen voll beladenen, 8 Tonnen schweren Strassenbahnwagen bei guten Gleisverhältnissen 33 *km* weit zu befördern.

Man hat dieses System jedoch wieder verlassen, weil unaufhörlich sich Ausbesserungen nötig machten, die den Betrieb störten und kostspielig machten.

XXIX. Kapitel.

Die praktische Anwendung der Akkumulatoren.

1. Wahl der Anzahl und Grösse der Zellen.

Da es bei Verwendung von Akkumulatoren für Zwecke der elektrischen Beleuchtung minder auf das Gewicht der Zellen ankommt, wählt man Zellen mit grösserer Kapazität und langer Lebensdauer, also solche mit starken Platten. Zum Fortbewegen von Fahrzeugen benutzt man leichtere Zellen mit dünneren Platten und geringerer Kapazität.[1])

Da bei der Entladung nur eine mittlere Spannung von 1,9 V für jede Zelle anzunehmen ist, wird man, wenn die Beleuchtungsanlage für E Volt Spannungsunterschied angelegt ist, durchschnittlich $\frac{E}{1,9}$ Zellen brauchen. Da aber anfänglich die Spannung beinahe 2 V und am Schlusse der Entladung 1,82 V beträgt, wird man eine Anzahl Zellen mehr benutzen und einige derselben zum Aus- und Einschalten einrichten, oder man wird vor die ganze Batterie einen Regulierwiderstand legen, dessen Widerstand so bemessen sein muss, dass man während der ganzen Dauer der Entladung die Spannung nahezu unveränderlich erhalten kann.

Bei Anlagen mit 65 V benutzt man z. B. im ganzen 36 Zellen und richtet 5 Zellen zum Ein- und Ausschalten ein (Regulierzellen).

Für Einrichtungen, die für 100 V bestimmt sind, sind 53 Zellen erforderlich, von denen man 6 zum Ein- und Ausschalten benutzt. Beträgt die Klemmenspannung für die Beleuchtungskörper 120 V, so kommen 66 Zellen zur Anwendung, von denen man 7 bis 9 als Regulierzellen benutzt.

Die Grösse der Zellen wählt man derart, dass die höchste zulässige Entladungsstromstärke mindestens gleich, womöglich aber

[1]) Für Zellen, die transportiert werden sollen, wird gelegentlich die Flüssigkeit durch einen Zusatz von Wasserglas in eine der Gelatine ähnliche Masse verwandelt. Solche Zellen besitzen aber etwas grösseren inneren Widerstand und haben eine wesentlich geringere Lebensdauer und etwas geringere Kapazität als Zellen mit reiner, verdünnter Schwefelsäure. Neuerdings wird dieser Kunstgriff wenig mehr verwendet.

etwas grösser ist als die voraussichtlich grösste Beanspruchung, und dass die Kapazität der Zellen so gross ist, dass nicht ein zu häufiges Neuladen erforderlich ist.

Beispiel: Von einer Akkumulatorenbatterie soll eine Beleuchtungsanlage bei 65 V betrieben werden, in der gelegentlich

1 Bogenlampe zu 10 A Stromstärke,
2 Bogenlampen zu je 6 A »
40 Glühlampen zu 16 NK
16 Glühlampen zu 25 NK

gleichzeitig brennen, und zwar soll die Anlage 6 Stunden lang ausschliesslich von den Akkumulatoren aus gespeist werden können.

Da die Spannung 65 V beträgt, sind im ganzen 36 Zellen nötig, von denen 5 als Regulierzellen zum Ein- und Ausschalten einzurichten sind.

Der Strombedarf einer 16kerzigen Glühlampe ist bei 65 V = 0,8 A; somit brauchen 40 solcher Lampen 0,8 × 40 = 32 A.

Jede 25kerzige Lampe braucht bei 65 V einen Strom von 1,25 A; somit beanspruchen 16 Stück eine Stromstärke von 1,25 × 16 = 20 A.

Der Gesamtstrombedarf ist somit:

$$10 + 2 \times 6 + 32 + 20 = 74 \text{ A.}$$

Die Entladestromstärke muss somit 74 A, die Kapazität 6 × 74 = 444 Ampèrestunden betragen.

Unter den Zellen der Akkumulatorenfabrik, Aktiengesellschaft in Berlin-Hagen in Westf., würde die Type G, 22b, die eine Kapazität von 446 Ampèrestunden bei 89 A Entladestromstärke besitzt, geeignet erscheinen.

Der Raum zur Unterbringung der 36 Zellen müsste 4,3 *m* lang, 2 *m* breit, 2 *m* hoch sein.

Da Bogenlampen beim Angehen stets erheblich mehr Strom brauchen als beim normalen Brennen und sich auch in allen Anlagen erfahrungsmässig mit der Zeit ein immer grösseres Lichtbedürfnis herausstellt, wählt man die zulässige Entladungsstromstärke und Kapazität der Zellen besser etwas grösser, als dem augenblicklich vorliegenden Bedürfnisse entspricht.

2. Schaltung der Akkumulatorenbatterie bei Gebrauch eines einfachen Zellenschalters.

Zum Laden von Akkumulatorenbatterien verwendet man zweckmässig nur Nebenschlussmaschinen, deren Klemmenspannung innerhalb der beiden Grenzen veränderlich ist, die einerseits durch die normale Betriebsspannung der Anlage und anderseits durch die höchste Spannung der Batterie am Schlusse der Ladung gegeben sind. Die beim Laden erforderlichen Veränderungen der Spannung der Dynamomaschine geschehen am besten durch einen in den Stromkreis der Feldmagnete eingeschalteten Regulierwiderstand.

Wenn beim Laden der Batterie einige Lampen mitbrennen sollen, so ist die in Fig. 398 dargestellte Schaltung die einfachste. Die Messinstrumente (Ampèremeter und Voltmeter) sind angedeutet; einige nur für diese Apparate bestimmte Umschalter und die nur für die

npen bestimmten Ausschalter sind behufs Vereinfachung der Zeich-
ıg weggelassen.

Es bezeichnet: D die Dynamomaschine, F den im Stromkreis der
ımagnete gelegenen Regulierwiderstand, AA die Akkumulatoren-
terie, Z' den Zellenschalter, U_1 und U_2 Umschalter, B Bleisiche-
gen, s einen selbstthätigen Unterbrecher, R einen Stromrichtungs-
;er und l,l die Lampen. S ist ein Strommesser, V ein Voltmeter.

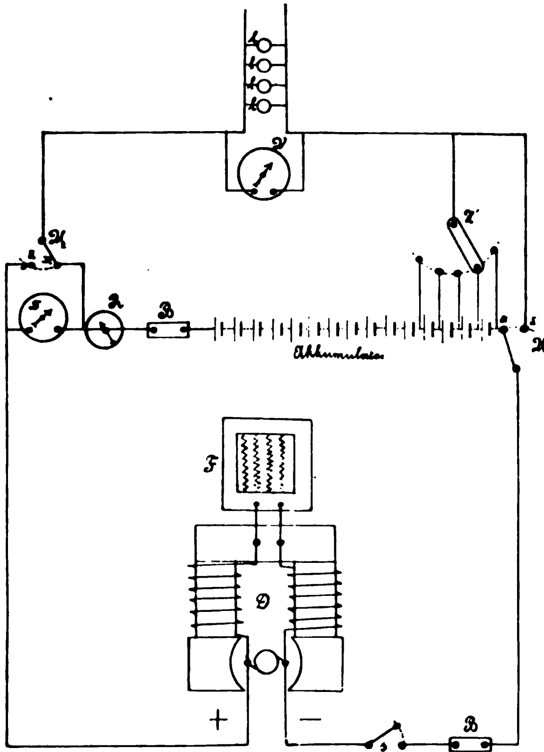


Fig. 398. Schaltung bei Gebrauch eines einfachen Zellenschalters.

a) Verbindet man am Umschalter U_1 den Schalthebel mit L und
erbricht bei Z' die Verbindung der Akkumulatoren mit der Lampen-
ung, so versorgt die Maschine allein die Lampen mit Strom; die
cumulatorenbatterie ist ausgeschaltet.

b) Wenn man durch Z' die Verbindung zwischen der Lampen-
ung und den Akkumulatoren ganz unterbricht und bei U_1 die
'bindung mit a herstellt, so ladet die Maschine alle Zellen in
ıtereinanderschaltung, und es brennen keine Lampen mit.

c) Sollen während des Ladens Lampen mit brennen, so verbindet man bei U_1 mit a. Der Strom, der durch die Lampen geht, wird den Zellen entnommen; er darf also nicht grösser sein als die zulässige Entladestromstärke der Zellen. Den Zellenschalter Z' stellt man so ein, dass die Lampen gerade mit der vorgeschriebenen Spannung brennen.

d) Wird am Umschalter U wieder mit L verbunden, werden die Lampen aber ausgeschaltet, so kann man durch Verstellen von Z' die am Ende der Batterie gelegenen Regulierzellen, die meist nur ganz wenig, erst gegen Schluss der Entladung, in Thätigkeit kommen, ausschalten, wenn sie durch lebhafte Gasentwickelung zeigen, dass ihre Ladung beendet ist.

Diese durch grosse Einfachheit ausgezeichnete Schaltung hat den Nachteil, dass der Strom, ausser bei der unter a) und d) beschriebenen Verbindung, immer durch die ganze Batterie geht, und dass daher die rechts von Z' liegenden Zellen durch starkes Überladen leiden, und in diesen Zellen elektrische Energie verschwendet wird.

Je nachdem man den linken Umschalter U_2 auf A oder auf M stellt, zeigt das Ampèremeter entweder den durch die Akkumulatoren fliessenden, oder den von der Maschine erzeugten Strom an.

3. Schaltung einer Akkumulatorenbatterie bei Gebrauch eines doppelten Zellenschalters.

Den eben erwähnten Übelständen geht man aus dem Wege, wenn man sich eines doppelten Zellenschalters bedient (Fig. 399). Der Gebrauch eines zweiten Zellenschalters Z'' gestattet die am Ende gelegenen Regulierzellen auszuschalten, wenn sie durch den Eintritt lebhafter Gasentwickelung zeigen, dass sie voll geladen sind.

a) Man unterbricht durch Z' die Verbindung der Batterie mit der Lampenleitung und verbindet bei U_1 mit L, wenn die Lampen ausschliesslich von der Maschine Strom empfangen, und die Akkumulatoren ausgeschaltet bleiben sollen.

b) Will man die Akkumulatoren laden, so verbindet man am Umschalter U_1 mit A. Man stellt am Zellenschalter Z'' anfänglich den Hebel auf die letzte Zelle und schaltet, vorwärts gehend, die letzten Zellen ab, wenn sie voll geladen sind. Wird der Hebel des Zellenschalters Z' ganz ausgeschaltet, so wird nur geladen, und keine Lampen brennen mit. Man kann jedoch Z' so stellen, dass die Akkumulatorenbatterie die für die Lampen passende Spannung giebt; dann können auch während des Ladens so viele Lampen mit brennen, als der höchsten zulässigen Entladestromstärke der Zellen entspricht.

c) Sollen bei grösserem Strombedarf Maschine und Akkumu-
›ren sich gleichzeitig an der Stromlieferung beteiligen, so wird bei
mit A verbunden. Die Hebel der beiden Zellenschalter müssen
dann immer auf derselben Zelle stehen; wenn die Spannung
indert werden soll, müssen Lade- und Entladehebel gleichzeitig
iter bewegt werden.

Durch Ein- oder Ausschalten von Drahtspulen am Regulier-

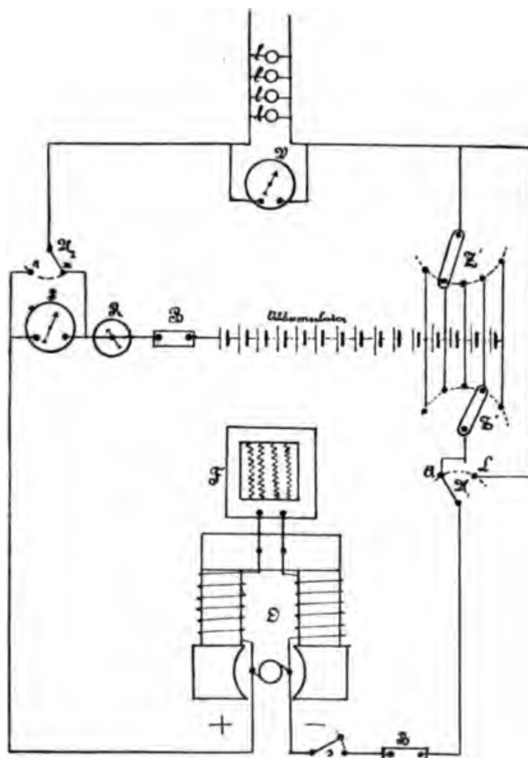


Fig. 399. Schaltung bei Gebrauch eines Doppelzellenschalters.

lerstande F gleicht man die Spannung der Maschine so ab, dass
gerade voll beansprucht wird.

Um von Zeit zu Zeit die Grösse sowohl des überhaupt abge-
›enen als des von den Akkumulatoren allein gelieferten Stromes
sich messen zu können, ist vor das Ampèremeter S ein Um-
ıalter U_2 gelegt.

Ferner ist es wünschenswert, den Spannungsmesser V so ein-
·ichten, dass er durch einen sechsteiligen Umschalter entweder
; der Lampenleitung, oder mit den Maschinenklemmen, oder mit

den eingeschalteten Enden der Akkumulatorenbatterie verbunden werden kann.

Wir halten es nicht für nötig, auf die besonderen Schaltungen näher einzugehen, welche gewählt werden müssen, wenn z. B. die Spannung der Nebenschlussmaschine nicht ausreicht, um die Akkumulatorenbatterie wirklich voll zu laden, und man sich deshalb entschliessen muss, die Akkumulatoren in zwei parallel geschalteten Hälften zu laden, oder die Schaltungen näher zu beschreiben, die man anwenden muss, wenn man sich aus irgend welchen Gründen einer Maschine mit gemischter Wickelung bedienen muss.[1])

4. Das Laden der Akkumulatoren unter Anwendung einer Zusatzmaschine.

In den meisten elektrischen Anlagen will man die Akkumulatorenbatterie in Parallelschaltung zur Stromerzeugermaschine benutzen, um bei mässiger Beanspruchung die Lampen und Motoren allein von der Dynamomaschine speisen, und den übrigen verfügbaren Strom zum Laden der Batterie verwenden zu können, zur Zeit des höchsten Verbrauches Strom der Dynamomaschine und der Batterie gleichzeitig entnehmen, und in der Periode des geringsten Strombedarfes, in den späteren Nachtstunden und am Morgen die Dynamomaschine ausser Betrieb setzen und die Stromlieferung der Batterie allein überlassen zu können.

Will man in diesem Falle nur eine Dynamomaschine verwenden, so muss es möglich sein, deren Klemmenspannung so hoch zu steigern, dass im Falle einer Überladung für jede der hinter einander geschalteten Zellen eine Spannung von ungefähr 2,7 Volt verfügbar ist. Handelt es sich um einen Betrieb mit 110 Volt, so müssen 60 Zellen verfügbar sein und deren Endspannung bei einer Überladung müsste $60 \cdot 2{,}7 = 162$ Volt betragen. Die Maschine, die im regelmässigen Betriebe mit 110 Volt zu arbeiten hat, müsste somit bei einer Überladung 52 Volt Klemmenspannung mehr zu geben imstande sein.

Da nun aber die Kosten einer Maschine sich nach der Grösse des Produktes aus höchster Stromstärke mal höchster Klemmenspannung richten, würde in diesem Falle die Maschine verhältnismässig teuer werden, ausserdem aber würde die Maschine entweder gelegentlich mit erheblicher Überlastung, oder in dem grössten Teile der Betriebszeit mit unvollkommener Belastung unwirtschaftlich arbeiten.

---

[1]) Die erforderlichen Auskünfte für solche Fälle giebt z. B. das Taschenbuch der Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft, Berlin, Fabrik Hagen i. W.

In vielen Fällen, zumal in grösseren Anlagen, ist es daher zweckmässiger für das Laden der Akkumulatorenbatterie eine Zusatzmaschine zu verwenden, die es gestattet, eine kleinere Hauptdynamomaschine und eine geringere Zahl von Schaltzellen zu verwenden und es ermöglicht, den Betrieb wirtschaftlicher zu gestalten. Die Hauptdynamo arbeitet alsdann stets nur mit der zum Betriebe der Verbrauchsapparate, Lampen, Motoren u. s. f. nötigen Spannung und wird für diese Spannung gebaut.

Der Teil des Stromes, der zum Laden der Sammlerbatterie bestimmt ist, wird durch den rotierenden Anker der Zusatzdynamomaschine geführt, dort wird seine Spannung um einen solchen Betrag erhöht, wie ihn die Ladung der Batterie erfordert. Die Erregung der Feldmagnete der Zusatzmaschine erfolgt entweder durch Strom, der der Hauptdynamo entnommen wird, oder der Erregerstrom wird von der Batterie selbst geliefert. Durch einen vor die Feldmagnete geschalteten empfindlichen Regulierwiderstand kann man die Stärke des Erregerstromes, dadurch die Spannung und damit die Stärke des Ladestromes nach Bedarf regeln.

Eine andere Möglichkeit, die Spannung und Stärke des Ladestromes zu regeln, liegt darin, dass man auch Vorkehrungen treffen kann, die Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers der Zusatzmaschine zu ändern.

Um den Ladestrom auf ein höheres Potential zu bringen, ist ein Arbeitsaufwand nötig; daher ist, um den Anker der Zusatzmaschine in Umlauf zu setzen, eine besondere Antriebsvorrichtung erforderlich. Man kuppelt deshalb den Anker meist mit einem Elektromotor von passender Grösse, oder man richtet es so ein, dass durch ein ausrückbares Vorgelege der Anker der Zusatzmaschine von der Betriebsmaschine (Dampfmaschine, Gaskraftmaschine, Turbine) unmittelbar angetrieben werden kann.

Die Fig. 400 zeigt die Schaltung bei Anwendung einer Zusatzdynamomaschine, wenn gleichzeitig ein Doppelzellenschalter verwendet wird. Die Hauptdynamomaschine (eine Nebenschlussmaschine) ist mit D, der zum Antrieb der Zusatzmaschine dienende Elektromotor mit E[1]) und die Zusatzmaschine mit ZD bezeichnet. Beim Laden werden die beiden Ausschalter A_1 und A_2 geschlossen. Wenn die Zusatzmaschine nicht arbeitet und Batterie und Maschine gleichzeitig Strom abgeben sollen, wird A_2 geöffnet und der Elektromotor

[1]) Die Verbindung einer Zusatzmaschine mit dem zu ihrem Antrieb dienenden Elektromotor wird vielfach Ladetransformator genannt. Bei den meisten derartigen Einrichtungen sind die Achsen der Anker des Elektromotors und der Zusatzmaschine durch eine elastische Kuppelung miteinander verbunden.

angehalten. Soll während des Nachtbetriebes die Akkumulatorenbatterie allein den nötigen Strom liefern, so wird der Schalter A_1 geöffnet und die Hauptdynamo angehalten.

Das mit elektrischer Energie zu versorgende Netz bleibt bei allen Schaltungen immer unter Strom. Die gleichbleibende Spannung im Netz wird durch Verschieben des Entladehebels (in der Fig. 400 der obere) des Doppelzellenschalters hergestellt.

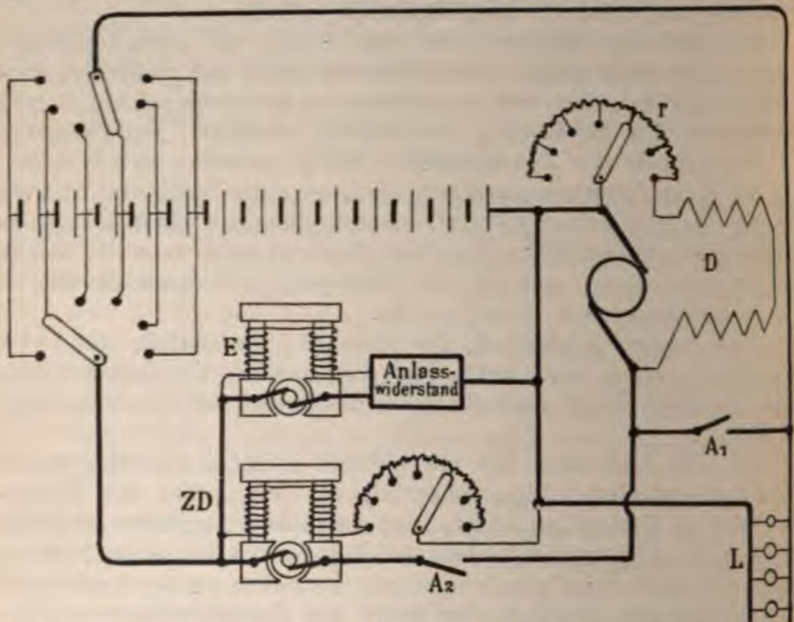


Fig. 400. Schaltung unter Anwendung einer durch einen Elektromotor angetriebene Zusatzmaschine.

Die Regulierung der Spannung der Hauptdynamomaschine wird durch Aus- und Einschalten von Widerstand r in den Stromkreis der Feldmagnete bewirkt. Spannung und Stärke des Ladestromes regelt man entweder durch Änderung des Widerstandes in den Stromkreis der Feldmagnetwickelung der Zusatzdynamo, oder durch Änderung der Umlaufsgeschwindigkeit des Ankers dieser Maschine. — Die Zusatzmaschine wird so gewählt, dass sie den im Höchstfalle zulässigen Ladestrom und die zum Laden erforderliche Zusatzspannung zu geben imstande ist.

Die grössere Verwickelung der Anlage und des Betriebes durch das Hinzutreten des Elektromotors, der Zusatzmaschine nebst Regulierwiderständen, sowie der für die Zusatzmaschine nötigen Strom- und Spannungsmesser, ist ja nicht sonderlich erwünscht und auch mit

erheblichen Kosten verknüpft; trotzdem aber gewährt in grösseren Anlagen der Gebrauch der Zusatzmaschine eine erhebliche Verminderung der Betriebskosten.

Bei elektrischen Centralstationen wird jetzt vielfach Dreileitersystem mit 2 × 240 Volt (2 × 110 an den Verbrauchsstellen, 2 × 10 Volt Verlust in den Speiseleitungen) gewählt und eine grosse Akkumulatorenbatterie als Reserve und als Stromquelle für die Arbeitspausen der Antriebsmaschine verwendet.

Der nicht isolierte Mittelleiter wird in diesem Falle an die Mitte der Akkumulatorenbatterie angelegt, sodass jede Hälfte des Dreileitersystems von je einer Hälfte der Batterie mit Strom versorgt wird. Mit Erfolg werden dazu sogenannte Dreileitermaschinen verwendet.

Anordnung und Schaltung der in solchen Fällen nötigen Maschinen und Apparate bei Gebrauch nur einer Zusatzmaschine zum Laden beider Hälften der Akkumulatorenbatterie zusammen, oder nur einer Hälfte allein, je nach Bedarf, zeigt das in Fig. 401 (folgende Seite) wiedergegebene Schaltungsschema.

In der Abbildung sind die selbstthätigen Doppelzellenschalter nicht mit aufgenommen. Mit A sind die Ampèremeter, mit V die Voltmeter, mit S die Bleisicherungen, mit St die Stromrichtungszeiger bezeichnet. NR bedeuten Nebenschlusswiderstände, AR einen Anlasswiderstand für den Elektromotor. Die Buchstaben: MA deuten selbstthätige Minimum-Ausschalter, HA doppelpolige Hebelausschalter, EHA einpolige Hebelausschalter und ES Voltmeterumschalter an.

Nicht selten verwendet man für den Antrieb der Zusatzmaschine auch zwei Elektromotoren beim Dreileitersystem, deren Felderregung kreuzweise geschaltet ist, d. h. die Erregung des +Motors in die —Seite und umgekehrt. Die Motore dienen dann gleichzeitig zum Ausgleich zwischen den beiden etwa ungleich belasteten Teilen des Dreileitersystems. [1])

5. Minimumausschalter und Maximumausschalter.

Die Anlagen mit Sammlerzellen unterscheiden sich durch einige besondere Apparate von anderen elektrischen Anlagen. Um zu verhüten, dass etwa eine Entladung der Zellen mit übermässiger Stromstärke durch den Anker der Maschine erfolgt, wenn der Riemen, der die Antriebsmaschine mit dem Stromerzeuger verbindet, plötzlich reisst oder abfällt, oder wenn die Dampfmaschine zum Stillstand gelangt, wird zwischen die Maschine und die Batterie stets ein selbstthätiger Minimum-Ausschalter gelegt.

---

[1]) Man findet Näheres hierüber in: Siemens & Halske, Elektrische Centralanlage, Berlin N., Springer, 1900, S. 315.

[redacted]

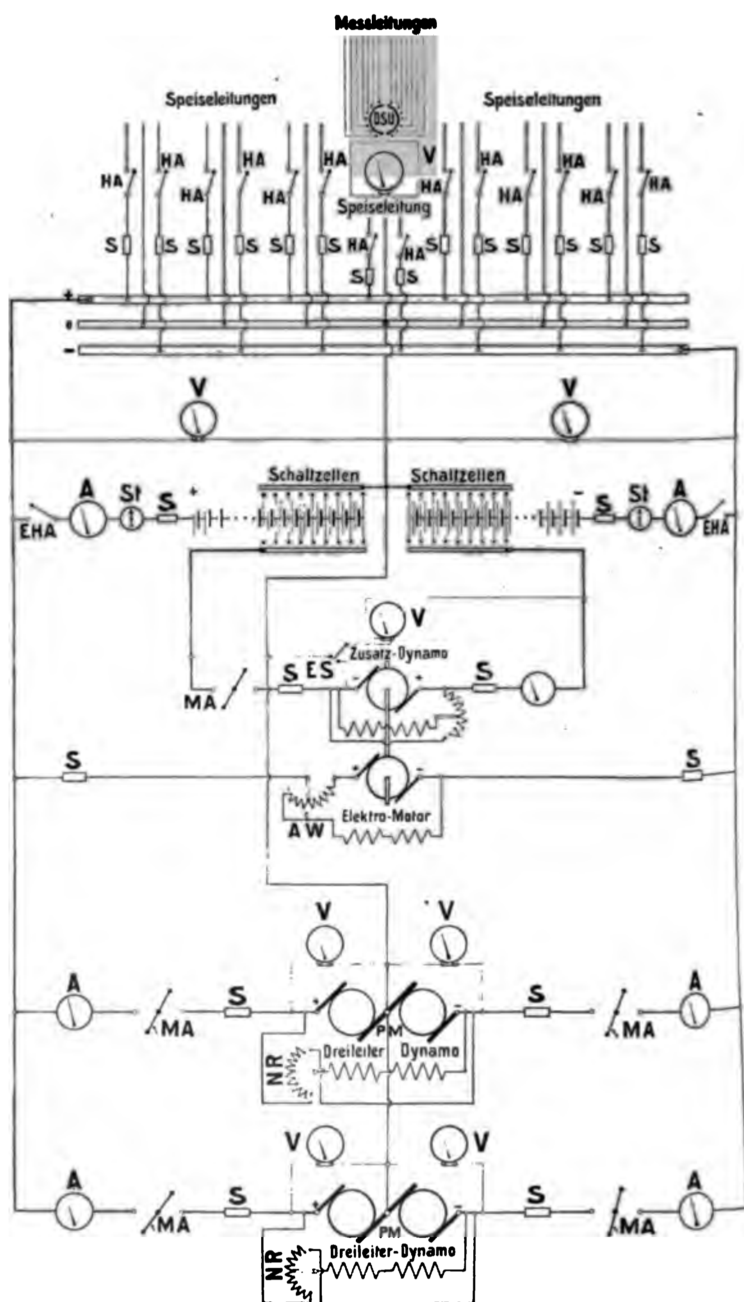


Fig. 401. Schaltung zweier Dreileitermaschinen und eines Ladetransformators für ein Verteilungsnetz mit Dreileitersystem.

Der Strom kehrt, wenn ein solcher Zufall eintritt, seine Richtung um und geht durch Null hindurch. Man richtet diese Ausschalter daher meist so ein, dass ein Elektromagnet, dessen Windungen vom Ladestrom durchflossen werden, einen Anker angezogen hält, den eine Federkraft oder ein Gewicht abzuziehen sucht. Wenn der Strom nun unter eine gewisse Stärke sinkt, wird der Anker abgerissen und dadurch eine dauernde Unterbrechung des Stromes bewerkstelligt.

Wir greifen aus der grossen Zahl solcher selbstthätiger Ausschalter (Automaten) eine von Hermann Müller herrührende Konstruktion heraus, die von der Elektr. Akt.-Ges. vormals Schuckert & Co. gebaut wird. (Vergl. Fig. 402.) Der eigentliche Ausschalter

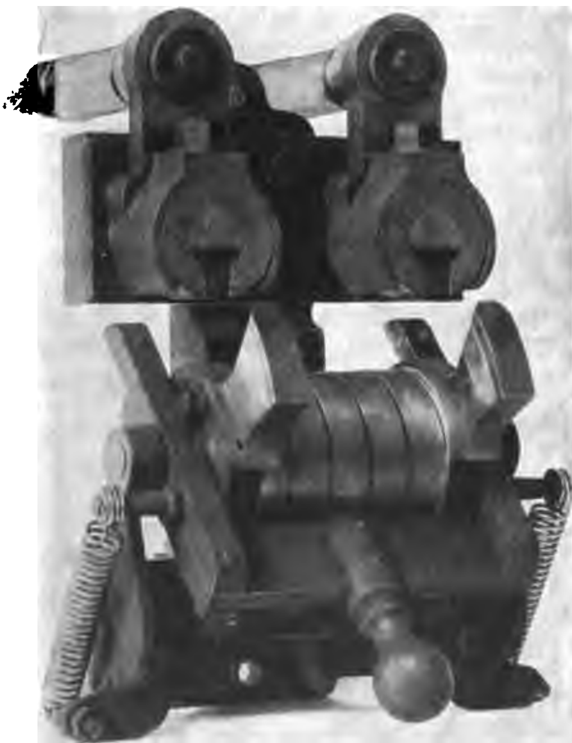


Fig. 402. Selbstthätiger Minimalausschalter der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co.

besteht aus zwei Kupfermessern, die sich mit sanfter Reibung zwischen eine Anzahl kupferner Federn schieben, deren Gesamtquerschnitt so gross ist, dass der Übergangswiderstand bei der normalen Strom-

stärke vernachlässigt werden kann. Den um eine Achse drehbaren Schalthebel suchen zwei kräftige Federn herab zu ziehen. Vom Ladestrom wird eine Spule durchflossen, dadurch wird ein Eisenkern magnetisiert, dessen beide Enden sich an einen Eisenanker legen, der auf der Grundplatte befestigt ist. Bei genügender Stromstärke wird der Kern in dieser Stellung festgehalten, trotzdem die gespannten Federn suchen, den Kern von seinem Anker loszureissen. (Die Fig. 402 zeigt den Apparat in geöffneter Stellung.)

Wenn die Stromstärke unter einen gewissen Betrag sinkt, nimmt der Magnetismus soweit ab, dass die Zugkraft der Federn überwiegt und das aus Elektromagnetkern, Ansätzen und Bronzebügel bestehende bewegliche System sich zu drehen beginnt. Da der Hebelarm, an dem die Federn oben anfassen, mit der Drehung wächst, wird die Drehung mit stark beschleunigter Geschwindigkeit ausgeführt. Der Bronzebügel schlägt alsdann auf den eigentlichen Ausschalter und mit einem plötzlichen Ruck werden die Schneiden aus den Blattfedern heraus gerissen, und dadurch wird der Strom unterbrochen.

Will man von neuem Strom durch die Zellen schicken, so muss der Ausschalter durch die Hand geschlossen werden.

Nicht selten aber will man auch Fürsorge treffen, dass die Zellen nicht mit einer zu grossen Stromstärke entladen werden können. Dann legt man unmittelbar vor die erste Zelle eine Vorrichtung, welche den Strom selbstthätig unterbricht, sowie die obere, zulässige Stromstärke überschritten wird, einen sogenannten Maximalausschalter.

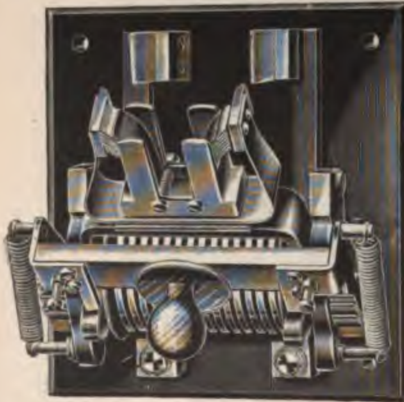


Fig. 403. Maximalausschalter von Voigt & Haeffner.

Fig. 403 stellt als Beispiel dieser Gruppe von Apparaten eine derartige Einrichtung von Voigt & Haeffner dar. Bei geschlossenem Ausschalter hängt der vordere Fallhebel mit einer Nase auf dem Anker. Der Anker wird durch eine Feder in kleinem Abstande von den Polen eines Elektromagneten fern gehalten. Die Windungen des Elektromagneten werden vom Strome durchflossen. Steigt der Strom über das zulässige Mass, so wird der Anker angezogen und dadurch der Fallhebel freigegeben, weil die Nase ihren Anhalt verliert. Der schwere Fallhebel fällt herab und schlägt die messerartige Schneide aus den Blattfedern heraus.

Dadurch wird der Strom unterbrochen.

Zumeist verbindet man mit solchen selbstthätigen Ausschaltern Weckapparate, die in Thätigkeit treten und den die Anlage bedienenden Arbeiter benachrichtigen, sowie der Strom unterbrochen worden ist.

Bei grösseren Akkumulatorenanlagen verbindet man ferner noch mit dem Hauptvoltmeter eine Einrichtung, die ebenfalls ein Klingelwerk in Thätigkeit setzt, wenn die Spannung der Batterie unter die zulässige Grenze sinkt, die Entladung also zu weit fortgeschritten ist.

6. Zellenschalter.

Auch die Zellenschalter müssen anders eingerichtet werden als etwa die Schaltvorrichtungen an Regulierwiderständen. Man legt gewöhnlich an die einzelnen Metallplatten des Zellenschalters der Reihe nach die positiven Platten des letzten Achtels bis Zehntels sämtlicher Zellen, während die übrigen Zellen dauernd in Hintereinanderschaltung miteinander verbunden sind. Würde nun die berührende Fläche des Schalthebels gleichzeitig auf zwei benachbarten solchen Metallstücken aufruhen, so würde dadurch die zwischenliegende Zelle kurz geschlossen sein und in kürzester Zeit mit einer ganz unzulässig grossen Stromstärke vollständig entladen werden.

Ständen jedoch die mit aufeinander folgenden Zellen verbundenen Metallstücke so weit auseinander, dass die Fläche der Schalthebel die eine Fläche schon verlassen hätte, ehe sie bei weiterer Drehung die folgende erreicht, so würde alsdann jedesmal beim Zu- oder Abschalten einer Zelle eine Unterbrechung des Stromes mit starker Funkenbildung eintreten. — Da beide Fälle unzulässig sind, so bringt man jedesmal zwischen zwei mit den positiven Plattensystemen aufeinander folgender Zellen verbundenen Kontaktstücken a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 noch ein durch Isolationsmaterial von den benachbarten Stücken isoliertes, schmäleres Zwischenkontaktstück b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 an. (Vergl. Fig. 404.) Den Schalthebel aber setzt man aus zwei voneinander durch ein Hartgummistück isolierten Metallstücken c d und f g zusammen, die durch einen Widerstand w (Draht oder Kohle) miteinander verbunden sind. (Vergl. Fig. 404.) Wenn nun die beiden Metallstreifen c d und b g des Schalthebels vorübergehend bei der Drehung auf zwei verschiedenen mit Zellen verbundenen Kontaktstücken a a aufruhen, so ist die zwischenliegende Zelle als-

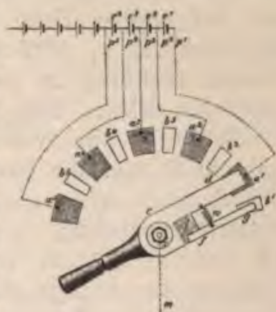


Fig. 404.
Einfacher Zellenschalter.

dann für diesen kurzen Zeitraum durch den Widerstand w geschlossen. Meist wählt man w so gross, dass bei 2 V Spannungsdifferenz gerade die höchste zulässige Entladestromstärke durch diesen Widerstand hindurchfliesst. Selbstverständlich muss man sich hüten den Schalthebel längere Zeit in einer Stellung stehen zu lassen, in der seine beiden Metallstücke zwei benachbarte, mit je einer Zelle verbundene Kontaktstücke a a berühren.

Hartmann & Braun und andere Firmen konstruieren sogenannte Momentanzellenschalter mit Knacken. Der an einem Federgehäuse mit Zahnrad befestigte Schleifkontakt springt, wenn man den Hebel vor- und rückwärts bewegt, jedesmal um einen Zahn weiter und gleitet dadurch rasch von einer Kontaktplatte auf die nächste. Ein Stehenbleiben des Schleifkontaktes auf zwei Lamellen ist bei dieser Anordnung unmöglich. Das Abschalten von Zellen erfolgt durch Rückwärtsdrehen des Hebels.

Wenn jederlei Bedienung in einer Elektrizitätsverteilungs-Anlage, z. B. in einer Centralstation, während gewisser Zeiten, etwa in den späten Nachtstunden und frühen Morgenstunden, gänzlich entbehrlich werden soll und die Spannung doch unveränderlich bleiben muss, so bedient man sich der selbstthätigen Doppelzellenschalter.

Der Kontaktschlitten T des Zellenschalters (vergl. Fig. 405, in der Abbildung schwarz gezeichnet) wird durch eine Schraube bewegt und die Drehung dieser Schraube wird durch einen umsteuerbaren kleinen Elektromotor E bewerkstelligt. Ist die Spannung der Akkumulatoren zu hoch, so legt sich der Kontakt eines Doppelrelais R auf der oberen Seite an (Verbindung zwischen C und 3); der Schaltmagnet s_1 wird erregt und der Motor setzt sich in einer solchen Richtung in Bewegung, dass eine Zelle der Batterie ausgeschaltet wird. Der Kontakt löst sich von selbst wieder, wenn die Schraube zwei volle Umgänge gemacht hat und der Schlitten sich damit um die Breite eines vollen Zellenkontaktstückes nebst Zwischenlage verschoben hat. Ist hingegen die Spannung der Batterie zu niedrig, so sinkt der Eisenkern in der Relaisspule, und die Scheibe C stellt leitende Verbindung mit 1 her; der kleine Elektromotor bewegt sich in entgegengesetztem Sinne, und durch Verschieben des Kontaktschlittens wird eine neue Zelle eingeschaltet. Auf der Ladeseite des Doppelzellenschalters wird der Kontaktschlitten dadurch bewegt, dass man die betreffende Schraube mit der Hand dreht. Eine Zelle wird ausgeschaltet, wenn sie durch lebhafte Gasentwickelung anzeigt, dass ihre Ladung beendet ist.

Der Doppelzellenschalter zerfällt in zwei Hälften, in die Ladeseite und in die Entladeseite. Auf jeder Seite wird ein aus Federn gebildeter Kontaktschlitten durch Drehung der Schrauben bewegt.

In der Mitte liegen die für beide Hälften gemeinsamen Zellenkontaktstücke. Jeder Kontaktschlitten schleift rechts und links auf zwei geteilten Unterlagen, die aus den je um eine halbe Teilung versetzten Zellenkontaktstücken und den dazwischen liegenden Vorsprüngen der Blindkontaktschienen zusammengesetzt sind. Der Zwischenraum zwischen den voneinander isolierten Stücken ist leer. Die Kontakt-

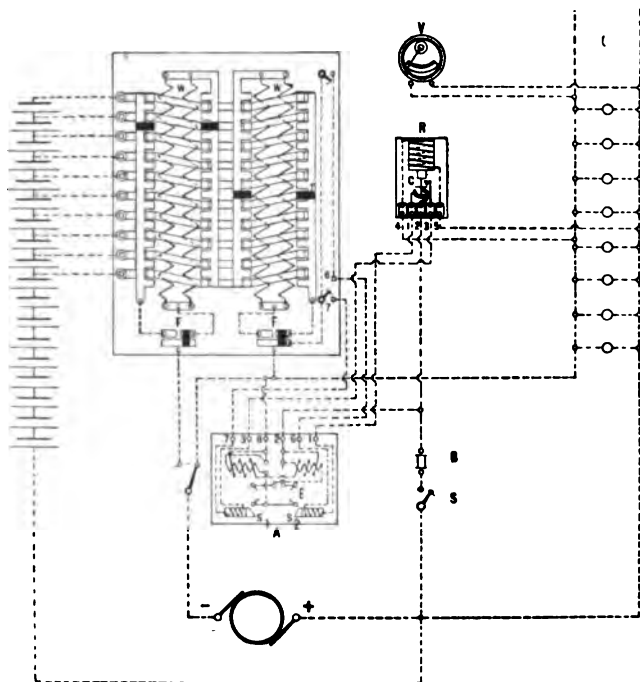


Fig. 405. Selbstthätiger Doppelzellenschalter mit Funkenentziehvorrichtung der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co.

federn der Schlitten sind voneinander isoliert. Die einzelnen Endzellen der Batterie sind mit den Kontaktstücken sowohl des Ladeschalters, als des Entladeschalters in der in der Figur 405 angedeuteten Weise verbunden.

Zwischen den Blindkontaktschienen ist je ein Zwischenwiderstand W angeordnet, durch welche in den Zwischenstellungen der Schlitten der Entladestrom fliessen muss. Ferner sind damit die Funkenentziehvorrichtungen F verbunden. Die Funkenentzieher sind einpolige Umschalter, die durch die Bewegung der Schrauben hin und her verschoben werden. Durch sie wird beim Verschieben des Kontaktschlittens die Stromzuführung zu den Kontaktfedern unterbrochen, ehe diese den berührten Zellenkontakt verlassen haben. Die

Funken beim Ab- und Umschalten von Zellen bilden sich infolgedessen nicht an den Zellenkontaktstücken, sondern an den auswechselbaren Kontaktstücken bei F. Das so lästige Festbrennen der Schlitten auf den Kontaktstücken, durch das früher lange Zeit die Anwendbarkeit der selbstthätigen Zellenschalter in der Praxis geradezu in Frage gestellt wurde, ist auf diese Weise in durchaus befriedigender Weise beseitigt.

Die Schraubenspindeln haben eine derartige Steigung, dass eine Drehung der Spindel um 360° den Kontaktschlitten um eine Teilung fortbewegt. Dabei wird das bewegliche Kontaktstück des Funkenentziehers bei der einen vollen Drehung hin-, bei der nächsten Drehung zurückgedreht, und zwar, wie bereits erwähnt worden ist, mit einer gewissen Voreilung, sodass das Ab- oder Zuschalten der Zelle schon erfolgt und die Funkenbildung abgelaufen ist, ehe die beweglichen Kontaktschlitten T ihren Schritt vollendet haben. In der Zwischenstellung beim Übergange von einer Zelle zur nächsten ist für eine sehr kurze Zeit eine Zelle durch den Zwischenwiderstand W kurz geschlossen.[1])

7. Stromrichtungszeiger.

Endlich sind alle Akkumulatorenanlagen mit einem Stromrichtungszeiger ausgestattet, aus dessen Angaben man ersehen kann, ob den Zellen Strom entnommen oder zugeführt wird. Es ist dies eine einfache Magnetnadel, unter der ein Draht, der vom Strome durchflossen wird, hingeht. Wenn der Strom bei der Ladung in die Batterie fliesst, wird diese Nadel nach der einen Seite abgelenkt, auf der »Laden« steht; wird den Zellen Strom entnommen, so wird die Nadel nach der anderen Seite abgelenkt und zeigt auf »Entladen«. Dieser Apparat ist besonders dann unentbehrlich, wenn ein gelegentliches Ummagnetisieren der zur Ladung dienenden Dynamomaschine nicht ausgeschlossen erscheint.[2]) Fig. 406 zeigt die Einrichtung dieses einfachen Apparates.



Fig. 406. Stromrichtungszeiger.

[1]) Eine nähere Beschreibung nebst Konstruktionszeichnung dieser von Schuckert & Co. gebauten Doppelzellenschalter giebt H. Müller in ETZ 1899, Bd. XX, S. 152 und in: Beschreibung von Anlagen und Erzeugnissen der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co., No. 11, 1901.

[2]) Bei der ersten Einschaltung und Ladung der Akkumulatorenbatterie untersucht man erst mit Polreagenzpapier, mit einem Polsucher oder mit einem Wasserzersetzungsapparat, dessen Elektroden durch zwei Bleistreifen

8. Aufstellung und Behandlung der Akkumulatoren.

Die Zellen einer Batterie sollen in einem kühlen, hellen Raume so aufgestellt werden, dass man sie jederzeit leicht in allen ihren Teilen übersehen kann.

Die Zellen werden mit Gummiplatten auf kleine Isolatoren und diese auf feste Holzgestelle gesetzt. Das Holz wird wiederholt mit heissem Teer getränkt und durch Glasuntersätze vom Fussboden isoliert. Das Gestell darf auch nicht durch Bandeisen an die Wand befestigt werden.

Zur Verbindung der Zellen untereinander wählt man am besten Bleistreifen, die mit den Elektrodenplatten verlötet sind. (Vergl. Fig. 346, S. 536, und Fig. 381, S. 578.)

Zur Verbindung der Enden der Batterie und der Regulierzellen mit dem Schaltbrett, auf dem man alle Schaltapparate und Messinstrumente zweckmässig vereinigt, wählt man entweder blanke oder mit Guttapercha isolierte Kupferdrähte. Blanke Drähte und Metallteile, sowie die Wände und die Decke der Räume, in welchen Akkumulatoren aufgestellt werden, erhalten einen Anstrich mit säurefester Isolierfarbe.

Nach Aufstellung der Batterie füllt man die Zellen mit verdünnter, chemisch reiner Schwefelsäure von vorgeschriebener Dichte, und zwar soll die Säure 1 *cm* über die obere Kante der Platten stehen; hierauf beginnt man sofort mit dem Laden. Das erste Mal ladet man, wenn möglich, 32 bis 48 Stunden lang, ohne inzwischen zu entladen, thunlichst auch ohne längere Unterbrechung. Auf die übrigen Regeln, die beim Gebrauche der Akkumulatoren zu beachten sind, ist schon früher (S. 542 und 549) hingewiesen worden.

Die wichtigsten Punkte, auf die besonders zu achten ist, sind die folgenden:

a) Man lade und entlade nicht mit grösserer Stromstärke, als für die Batterie zulässig ist. Alle Monate überlade man einmal um ungefähr $^1/_8$ der normalen Ladezeit.

b) Ist einmal aus Versehen zu weit entladen worden, so beginne man sofort mit dem Laden, anfänglich mit geringer Stromstärke, und überlade hierauf einige Stunden.

c) Man lasse die Batterie nie im ungeladenen Zustande stehen.

---

gebildet werden, die Lage der Pole an den von den Maschinen herkommenden Drähten. Den Wasserzersetzungsapparat füllt man mit fast reinem Wasser, um einen genügend grossen Widerstand zu haben. Das Drahtende, welches mit demjenigen Bleistreifen verbunden war, der nach einiger Zeit braun geworden ist, legt man an den positiven Pol (die braunen Platten) der Akkumulatorenbatterie.

d) Wird die Batterie (z. B. in manchen Beleuchtungsanlagen im Sommer) längere Zeit nicht benutzt, so lade man sie alle 3 bis 4 Wochen wieder ganz voll.

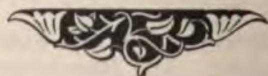
e) Man sorge durch Nachfüllen mit verdünnter Säure dafür, dass die Säure die Platten immer vollständig bedeckt und am Schlusse der Entladung die Dichte ziemlich genau 1,13 ist.

f) Man überzeuge sich durch genaue Besichtigung, Prüfung der Säuredichte mit dem Aräometer und gelegentliche Messung der Spannung jeder einzelnen Zelle davon, dass alle Zellen vollständig richtig arbeiten. Besonders dringlich ist solche Prüfung für eine Zelle, die später als andere am Schlusse der Ladung mit der Gasentwickelung beginnt oder rascher als andere erschöpft ist. Eine solche Zelle wird dann mit beiden Polen von den übrigen abgetrennt und mehrere Male nur beim Laden, nicht aber beim Entladen, eingeschaltet; man setzt diese Behandlung fort, bis die Zelle wieder normal funktioniert.

Werden alle diese Regeln stets genau innegehalten, so kann man, wenigstens bei Beleuchtungszellen, auf eine 8- bis 12-jährige Haltbarkeit der Platten guter Akkumulatoren rechnen.[1]) Jede auch nur vereinzelte Abweichung vermindert die Lebensdauer der Platten erheblich.

---

[1]) Der Verfasser hat in seinem Laboratorium eine Anzahl sogenannter Tudor-Zellen der Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft Berlin, Fabrik in Hagen i. W. in Gebrauch, die nunmehr seit 12 Jahren in unausgesetzter, zum Teil angestrengter Benutzung sind, in welcher nie eine Platte ausgewechselt werden musste, und die, abgesehen von einem geringfügigen Rückgange der Kapazität, noch durchaus betriebsfähig sind.



Namen- und Sachregister.



Druck von Oskar Leiner in Leipzig. 50937

Averdieck, Ing. **W.** **Die Installation unter Berücksichtigung** des »System Bergmann«. Ein Leitfaden für Monteure und alle diejenigen, welche die Herstellung von Lichtanlagen zu veranlassen haben. gr. 8°. 54 Seiten. Mit 88 Abbildungen und 1 Tafel. Brosch. ℳ 2.—.

Biscan, Prof. **Wilh.** **Die Bogenlampe. Physikalische Gesetze,** Funktion, Bau und Konstruktion derselben, für Mechaniker, Installateure, Maschinenschlosser, Monteure etc., sowie als Anleitung zur Anfertigung von Bogenlampen. gr. 8°. 86 Seiten. Mit 74 Abbildungen. Brosch. ℳ 2.—, geb. ℳ 2.50.

Inhalt: Das Wesen des Bogenlichtes. Geschichtliche Mitteilungen. Beschreibung verschiedener Bogenlampen. Schaltung der Bogenlampen. Verwendung der Bogenlampen. Nebenapparate für Bogenlampen.

Biscan, Prof. **Wilh.** **Die Dynamomaschine. Zum Selbststudium** für Mechaniker, Installateure, Maschinenschlosser, Monteure u. s. w., sowie als Anleitung zur Selbstanfertigung von Dynamomaschinen leicht fasslich dargestellt. 8. vermehrte Auflage. gr. 8°. 126 Seiten. Mit 110 Abbild. Brosch. ℳ 2.—, geb. ℳ 2.75.

Inhalt: Statische und dynamische Elektricität. Erregungsarten der Elektricität. Das Ohm'sche Gesetz. Stromerzeugende Maschinen. Konstruktionsbedingungen. Beschreibung einiger Gleichstrommaschinen. Wechselstrommaschinen.

Biscan, Prof. **Wilh.** **Die elektrischen Messinstrumente. Die** wissenschaftlichen Messinstrumente und Messbehelfe. gr. 8°. 102 Seiten. Mit 98 Abbildungen. Brosch. ℳ 3.—, geb. ℳ 3.75.

Inhalt: Einleitung. Wirkung des Stromes. Voltameter. Galvanometer. Elektrodynamometer. Elektrometer. Normalelemente. Anhang.

Biscan, Prof. **Wilh.** **Formeln und Tabellen für den praktischen Elektrotechniker.** Ein Hilfs- und Notizbuch. 4. Aufl. kl. 8°. 140 Seiten. Mit Abbildungen u. 4 Tafeln. Geb. ℳ 2.—.

Aus dem Inhalt: Absolutes Maass. Elektrochemisches Äquivalent. Akustik. Blechgewichte. Bleischalter. Bespinnung von Kupferdrähten. Bogenlicht. Brechungsexponent. Brennmaterial. Deklination. Drahtlehre. Drahtseile. Dynamometer. Elektrodynamik. Elektrolyse. Elemente. Festigkeit. Glühlampen. Inklination. Induktion. Leitungen. Photometrie. Querschnitte. Riemen. Schmelzpunkte. Schrauben. Spezifische Gewichte. Spezifische Widerstände. Stromstärkeeinheiten. Universal-Galvanometer. Wärmelehre. Wellen. Die trigonometrischen Zahlen. Mathematik u. s. w. u. s. w.

LEIPZIG, OSKAR LEINER, 53081

